This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

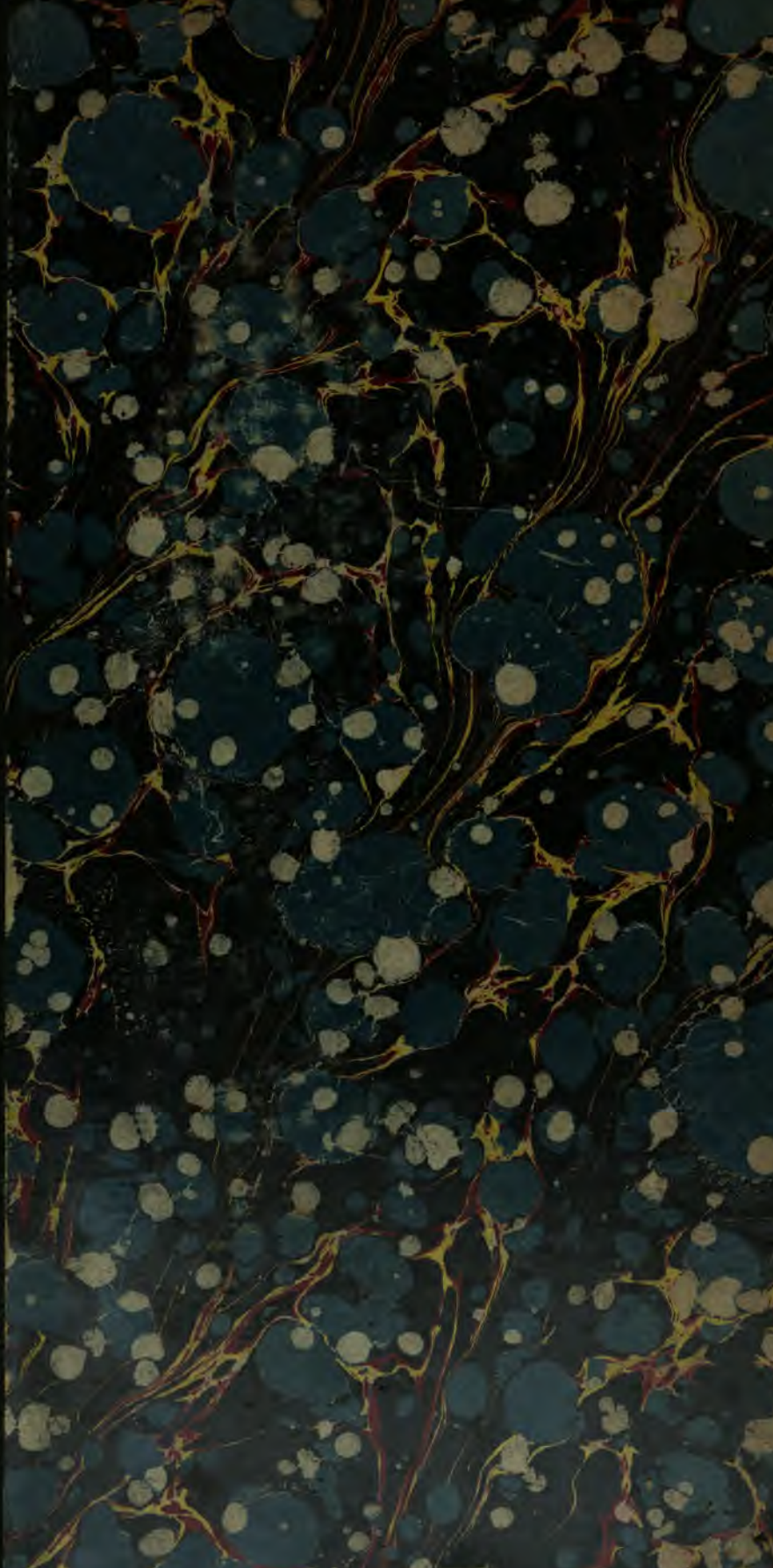
+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`



University of Wisconsin
LIBRARY.
No. 24717
TPK
P17

TRAITÉ

DE

PHOTOMÉTRIE INDUSTRIELLE

8582-91. — CORBEIL, IMPRIMERIE CRÉTÉ.

TRAITÉ

DE

PHOTOMÉTRIE

INDUSTRIELLE

SPÉCIALEMENT APPLIQUÉE A L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

PAR

A. PALAZ

DOCTEUR ÈS SCIENCES, PROFESSEUR D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES (École d'Ingénieurs)

DE L'UNIVERSITÉ DE LAUSANNE

PARIS

GEORGES CARRÉ, ÉDITEUR

58, RUE SAINT-ANDRÉ-DES-ARTS, 58

—

1892

6827094

TPLE
·P17

PRÉFACE

Depuis l'introduction de la lumière électrique les exigences du public, séduit par les avantages d'un éclairement abondant, sont devenues de plus en plus grandes. L'impulsion donnée à l'industrie de l'éclairage n'en est devenue que plus vive. Les développements de l'éclairage électrique ont déterminé une foule de recherches sur les conditions actuelles de production de la lumière et sur les meilleurs procédés de mesure et de répartition. Il en est résulté une transformation complète des méthodes photométriques qui constituent maintenant un ensemble important. Mais ces nombreux travaux sont disséminés dans les journaux spéciaux français et étrangers et leur utilisation est très difficile, sinon impossible.

C'est ce qui nous a engagé à fondre en un tout homogène et à coordonner les résultats acquis, afin de fournir à l'ingénieur chargé de l'installation et du contrôle des appareils d'éclairage les renseignements si divers dont il a besoin. Notre tâche a été facilitée par le fait que nous avons suivi, depuis l'année 1887 déjà, les progrès des méthodes photométriques dans les divers articles que nous avons publiés dans le journal *La Lumière électrique*.

Il n'existe pas, à notre connaissance, d'ouvrage français sur la photométrie industrielle; il faut se contenter des quelques renseignements contenus dans les chapitres spéciaux des traités consacrés à l'éclairage par le gaz, ou par l'électricité. En Allemagne, le petit manuel de Krüss : *die Elektrotechnische Photometrie*, a eu un certain succès qui nous avait fait former le projet d'en préparer une traduction française. Mais depuis la date de sa publication (1885) cet ouvrage a passablement vieilli par suite des

24717 15 9

grands progrès réalisés à la suite des nombreuses recherches de ces dernières années ; en outre quelques parties sont un peu incomplètes. Aussi avons-nous renoncé à ce premier projet, sans abandonner cependant l'idée de publier un ouvrage sur la matière.

C'est cet ouvrage que nous présentons aujourd'hui au public, espérant qu'il pourra rendre quelques services à tous ceux, ingénieurs électriciens ou ingénieurs du gaz, qui ont à s'occuper des questions si complexes d'éclairage. Nous ne nous faisons pas illusion sur les imperfections de notre travail, le premier de cette étendue. Nous serions particulièrement reconnaissant envers tous ceux qui voudront bien nous faire part de leurs observations ou de leurs critiques.

Nous avons insisté avec beaucoup de soin sur les nombreux appareils photométriques, imaginés surtout pendant ces dernières années, afin de montrer de quelle variété de méthodes et d'appareils on dispose actuellement en photométrie. Cette diversité d'appareils ne nous a pas empêché d'étudier en détail les appareils pratiques couramment utilisés, les photomètres de Foucault, de Bunsen, de Lummer et Brodhun, entre autres.

Le chapitre consacré aux étalons photométriques est très complet ; on ne saurait trop insister sur l'importance d'une reproduction facile et exacte de l'étalon lumineux. Il nous a paru indispensable de mettre sous les yeux du lecteur les résultats les plus sûrs fournis par les nombreux étalons photométriques dont il a été fait usage jusqu'à maintenant.

Les divers appareils auxiliaires de la photométrie pratique sont étudiés dans le chapitre quatrième ; dans le cinquième nous avons étudié les propriétés photométriques des lampes à incandescence et à arc et complété ces renseignements par des considérations sur les foyers lumineux usuels et sur les progrès futurs à réaliser dans la production de la lumière artificielle.

Un chapitre sur la répartition de l'éclairage termine l'ouvrage. Ce chapitre est forcément un peu incomplet, car l'éclairage artificiel public et privé demanderait à être étudié pour lui-même, au double point de vue physique et constructif. Mais nous avons

dû nous limiter afin de ne pas dépasser outre mesure les limites assignées à notre travail.

Nous avons indiqué les principales sources bibliographiques des mémoires que nous avons mentionnés, afin de mettre le lecteur, désireux de compléter l'étude d'une question spéciale, à même de recourir aux mémoires originaux. Nous nous sommes cependant imposé une limite afin de ne pas trop surcharger l'ouvrage de notices bibliographiques, et il nous a semblé inutile de reproduire à la fin du volume la bibliographie complète des questions photométriques, et la liste des nombreux mémoires que nous avons utilisés.

A. Palaz.

Lausanne, décembre 1891.

TRAITÉ
DE PHOTOMÉTRIE

CHAPITRE PREMIER

LES BASES DE LA PHOTOMÉTRIE

Loi photométrique fondamentale.

1. Les sources lumineuses usuelles ont des dimensions finies (flammes, corps incandescents, arc voltaïque, etc.). Mais, pour établir la loi photométrique fondamentale à laquelle Bouguer et Lambert sont parvenus les premiers, il faut d'abord considérer un luminaire théorique, formé par un point lumineux. On généralise ensuite les résultats obtenus en les appliquant aux sources lumineuses de dimensions finies.

Soit donc O une source de lumière assez petite pour qu'on puisse la considérer comme concentrée en un point. Si on la place au centre d'une enceinte sphérique S′ (fig. 1) de rayon r', de surface homogène et uniforme (recouverte, par exemple, d'un enduit mat de blanc de céruse), toutes les parties de la paroi paraissent également éclairées.

La source lumineuse émet une *quantité de lumière* Q déterminée; cette quantité de lumière est reçue en entier par la paroi de l'enceinte sphérique dont la surface est $4\pi r'^2$. Puisque toutes les parties de la paroi paraissent également éclairées, une surface égale à l'unité découpée dans n'importe quelle partie de la paroi reçoit une quantité de lumière

$$q' = \frac{Q}{4\pi r'^2}.$$

Une autre enceinte sphérique et concentrique de rayon r'' recevrait également la même quantité de lumière Q; mais l'unité de surface de cette sphère ne recevrait alors que la quantité

$$q'' = \frac{Q}{4\pi r''^2}.$$

Il en résulte donc :

$$\frac{q'}{q''} = \frac{r''^2}{r'^2}, \tag{1}$$

c'est-à-dire que *les quantités de lumière reçues par l'unité de surface des enceintes sphériques de rayons* r′ *et* r″ *sont inversement proportionnelles au carré des rayons* r′ *et* r″ (*loi des distances*).

2. Considérons en outre une surface fermée, de forme quelconque, située à l'intérieur de l'enceinte sphérique S′ ; cette surface reçoit évidemment la même quantité de lumière Q que l'enceinte. Découpons une partie

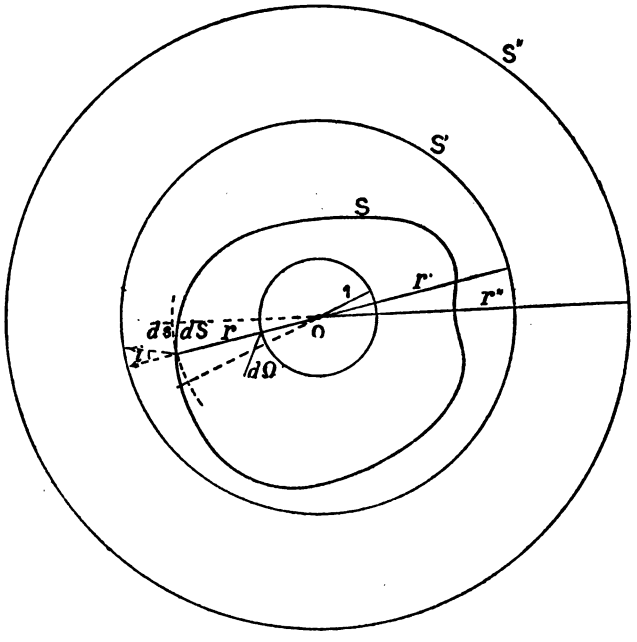


Fig. 1.

quelconque dS de cette surface par un cône ayant son sommet au centre O de la sphère ; soit $d\Omega$ l'angle solide correspondant à dS, c'est-à-dire la portion correspondante de la surface de la sphère de rayon égal à l'unité. La quantité dq de lumière reçue par dS est alors la même que celle que reçoit l'élément $d\Omega$; or celui-ci reçoit la quantité de lumière

$$\frac{Q}{4\pi} d\Omega;$$

donc

$$dq = \frac{Q}{4\pi} d\Omega.$$

Mais $\frac{Q}{4\pi}$ est une constante qui caractérise l'émission lumineuse de la

source O ; on l'appelle l'*intensité totale* et on la désigne par la lettre I ; on a donc :

$$I = \frac{Q}{4\pi}. \qquad (2)$$

La formule précédente devient donc :

$$dq = I d\Omega.$$

Si $d\Omega = 1$ on a $dq = I$; c'est-à-dire l'*intensité totale est égale à la quantité de lumière émise dans un angle solide égal à l'unité.*

Appelons ds la projection de l'élément dS sur le plan perpendiculaire au rayon vecteur r de l'élément dS ; i désignant l'angle de la normale à dS avec le rayon vecteur, on a :

$$ds = dS \cos i$$

et

$$\frac{d\Omega}{ds} = \frac{1}{r^2};$$

donc

$$d\Omega = \frac{ds}{r^2} = \frac{dS \cos i}{r^2},$$

par conséquent

$$dq = I d\Omega = \frac{I dS \cos i}{r^2}; \qquad (3)$$

c'est-à-dire, *la quantité de lumière reçue par un élément de surface* dS *dont la normale fait un angle i avec la direction du rayon lumineux est proportionnelle au cosinus de l'angle d'incidence i.*

On appelle *intensité d'éclairement* d'une surface en un point donné de celle-ci, le rapport de la quantité de lumière reçue par l'élément dS de surface en ce point à la superficie de cet élément ; on désigne généralement l'intensité d'éclairement par e. On a donc :

$$e = \frac{dq}{dS} = \frac{I \cos i}{r^2}. \qquad (4)$$

Si la surface dS est égale à l'unité, on a $e = dq$; l'intensité d'éclairement peut donc être aussi considérée comme étant la quantité de lumière reçue par l'unité de surface.

3. Au lieu de supposer la source lumineuse concentrée en un point, admettons qu'elle ait la forme d'une sphère de rayon R. Chaque élément dS de la surface prend part à l'émission lumineuse et la quantité de lumière émise par cet élément dS est

$$dq = Q \frac{dS}{4\pi R^2} = \frac{Q}{4\pi R^2} dS = \frac{I}{R^2} dS.$$

Dans ces formules, Q représente la quantité totale de lumière émise par le foyer et I son intensité totale ; si l'on suppose $dS = 1$, on a $dq = \frac{Q}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}$.

L'expression $\frac{Q}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}$ qui représente la quantité de lumière émise normalement par l'unité de surface de la source lumineuse s'appelle l'*intensité intrinsèque* ou l'*éclat* de la source; on la désigne par la lettre i (1); on a donc :

$$i = \frac{Q}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}; \tag{5}$$

on en déduit

$$Q = 4\pi R^2 i.$$

La quantité totale de lumière Q émise par un foyer lumineux est donc égale au produit de son éclat par sa surface. On en déduit ensuite l'intensité totale I à l'aide de la formule 2.

Considérons une source lumineuse limitée par une surface plane AB; supposons l'intensité intrinsèque i constante en tous les points de la

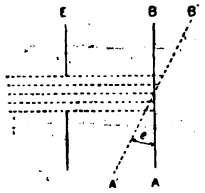


Fig. 2.

source; la quantité de lumière émise par la surface S du plan AB, déterminée par l'ouverture de l'écran E, est égale à i S, et l'émission lumineuse a lieu normalement au plan AB.

Inclinons maintenant la surface AB et amenons-la dans la position A'B' : à l'ouverture S de l'écran correspond une surface S' du plan AB. On constate expérimentalement que la quantité de lumière traversant l'ouverture de l'écran n'a pas varié. Or, si e désigne l'angle des plans AB et A'B', on a :

$$S' = \frac{S}{\cos e};$$

et puisque la lumière émise n'a pas varié et que la surface d'émission a augmenté dans le rapport de i' à $\cos e$, il faut que l'intensité intrinsèque I ait diminué dans le même rapport; on doit donc avoir :

$$i' = i \cos e.$$

Cette loi empirique donnée pour la première fois par Lambert (2) est connue sous le nom de *loi du cosinus*.

(1) Nous employons la même lettre i pour désigner l'angle d'incidence et l'intensité intrinsèque, parce qu'il ne peut y avoir de confusion.

(2) Lambert, *Photometria sive de mensura et gradibus luminis*, 1760.

Une autre preuve de l'exactitude de la loi du cosinus résulte du fait qu'une sphère métallique incandescente apparaît dans l'obscurité comme un disque lumineux uniforme. Un élément quelconque de la surface de l'hémisphère visible envoie donc à l'œil la même quantité de lumière que celle qui serait émise normalement par la projection de l'élément sur la base de l'hémisphère.

Il faut remarquer cependant que la loi du cosinus n'est exacte qu'autant qu'on peut négliger les phénomènes de diffraction et de réflexion, et que l'angle e est très petit. Il faut l'envisager comme une loi approximative et non comme une loi rigoureuse. Des expériences récentes de M. Seeliger (1), en particulier, ont montré que les écarts de cette formule avec les résultats de l'observation directe dépassent souvent 1 p. 100, même pour des incidences très faibles.

4. *Loi photométrique fondamentale.* — On peut résumer les lois qui précèdent dans une seule formule. Soit dS un élément infinitésimal d'une surface lumineuse au point où l'intensité intrinsèque est i; soit dS' un élément infinitésimal d'une seconde surface S' éclairée par la première, appelons d la distance des deux éléments, e l'angle de d avec la normale à dS et i l'angle de d avec la normale à dS'. La quantité de lumière émise par dS et reçue par dS' est donnée par la formule

$$q = i\frac{dS\,dS'}{d^2}\cos e \cos i.$$

En admettant que les dimensions de la quantité de lumière soient les mêmes que celles de la quantité de chaleur, on a, en tenant compte des relations

$$Q = 4\pi I$$
$$i = \frac{[I]}{[S]}$$
$$e = \frac{[I]}{[d]^2}$$

les dimensions suivantes :

$$\dim Q = \dim I = [ML^2T^{-2}]$$
$$\dim i = \dim e = [MT^{-2}]$$

Le choix d'une unité pour l'intensité I détermine aussi le choix de l'unité d'éclat et de l'unité d'éclairement, ainsi que le montrent les formules précédentes.

Il y aura lieu de revenir sur ce point spécial lorsqu'il s'agira d'étudier les foyers lumineux usuels et les problèmes de la répartition de l'éclairage.

(1) *Berichte der bay. Acad. der Wiss.* 1888, p. 201 et *Lum. él.*, vol. XXV, p. 615.

Intensité de la lumière d'après la théorie ondulatoire.

5. D'après la théorie ondulatoire, la lumière est le résultat d'un mouvement vibratoire de l'éther, se propageant en ligne droite. L'équation de ce mouvement est :

$$v = \frac{v_1}{d} \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{d}{c}\right).$$

Dans cette équation, v est la vitesse d'une molécule d'éther de masse μ au point considéré et au temps t; ce point est situé à la distance d de la source lumineuse où l'amplitude maximum est v_1; la période du mouvement vibratoire est T et la longueur d'onde λ est reliée à la vitesse de translation c du mouvement vibratoire par la relation

$$\lambda = cT.$$

On sait que la couleur de la lumière dépend de la valeur de la longueur d'onde. Une lumière est dite monochromatique lorsqu'elle n'émet que des vibrations de l'éther de même longueur d'onde. Les sources lumineuses usuelles émettent de la lumière complexe, c'est-à-dire produisent un mouvement vibratoire complexe.

Ce mouvement complexe est formé par la superposition des mouvements ondulatoires simples correspondant à une même longueur d'onde; les mouvements ondulatoires de l'éther jouissent de la propriété que la vitesse de translation $c = \frac{\lambda}{T}$ est indépendante de la longueur d'onde; c'est du moins ce que les expériences les plus précises ont constaté.

La qualité de la lumière d'une source donnée dépend de la longueur d'onde des radiations émises et du rapport suivant lequel les vibrations de longueurs d'ondes différentes concourent à la formation de la lumière complexe émise.

L'intensité du mouvement vibratoire en un point donné où se trouve l'élément superficiel dS est égale à la force vive des molécules d'éther μ, qui sont situées sur cet élément au temps t; mais cette force vive variant continuellement, on considère la force vive moyenne de ces molécules pendant la durée d'une oscillation pour représenter cette intensité; on aura donc :

$$I = \frac{1}{T}\int_0 \frac{\mu}{2}\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 dt$$

et, en remplaçant v par sa valeur, on obtient :

$$I = \mu . \frac{\pi^2}{T^2} . \frac{v_1^2}{d^2}.$$

L'intensité d'une vibration lumineuse monochromatique est donc une quantité mathématiquement définie; on voit qu'elle est proportionnelle

au carré de l'amplitude maximum v_1. Mais on ne peut pas déterminer directement cette intensité, car on ne peut pas mesurer les quantités μ et v_1 ; on peut à la rigueur se dispenser de connaître la masse μ puisque ce facteur disparaît dans la comparaison de deux intensités lumineuses.

La comparaison de deux intensités lumineuses monochromatiques se réduit donc à la comparaison des amplitudes du mouvement vibratoire. Malheureusement, il n'est pas possible de mesurer cet élément comme on mesure les longueurs d'onde, par exemple. Aussi faut-il recourir, pour mesurer l'intensité d'une radiation lumineuse, aux actions qu'elle exerce sur diverses substances ou sur divers phénomènes.

Actions diverses de la lumière.

6. En faisant abstraction de l'action de la lumière sur les propriétés électriques et magnétiques de certains corps et sur certains phénomènes électriques, on peut distinguer trois genres d'actions différentes de la lumière, savoir les actions calorifiques, chimiques et éclairantes.

Pendant longtemps on a distingué dans la lumière d'une source donnée, dans la lumière solaire, par exemple, des radiations chimiques, des radiations calorifiques et des radiations éclairantes ; cette distinction est tout à fait arbitraire et les courbes qui représentent les variations de l'intensité relative des radiations chimiques, calorifiques et lumineuses d'une lumière donnée, ne sont au fond que la représentation graphique des spectres d'absorption des substances ayant servi à leur étude, par exemple des sels d'argent, du noir de fumée, et de la rétine.

La présence des ondulations de l'éther, d'une longueur d'onde déterminée, se constate à l'aide de l'un des phénomènes mentionnés ci-dessus. On sait, par exemple, que ce sont seulement les vibrations de l'éther dont la longueur d'onde est comprise entre $0^{\mu},360$ et $0^{\mu},810$ qui agissent sur l'œil et produisent une impression lumineuse (1 micron = 1 μ = 0,001 mm.).

Les autres vibrations, dont la longueur d'onde est plus grande ou plus petite, n'exercent aucune action lumineuse sur la rétine et ne peuvent être constatées que par l'action qu'elles exercent sur d'autres substances, action calorifique ou chimique ; cependant, le fait de ne pouvoir observer, à l'aide d'un procédé donné, la présence de vibrations de longueur d'onde déterminée dans un faisceau lumineux, ne permet pas de conclure qu'elles n'existent pas, car elles exigent souvent, pour être constatées, des méthodes et des appareils excessivement sensibles.

Les radiations à faible longueur d'onde (ultra-violettes) se constatent généralement par leur action chimique, tandis que les radiations à longueur d'onde considérable se constatent par leur action calorifique (radiations infra-rouges).

Cependant, il ne faut pas conclure que l'action calorifique des premières soit nulle ou que l'action chimique des secondes le soit aussi, car une radiation de longueur d'onde déterminée peut exercer à la fois les trois actions chimiques, calorifiques et lumineuses.

Voici, pour préciser, quelles sont les données relatives aux principales radiations qui peuvent être constatées par les moyens dont on dispose actuellement.

Qualités des radiations et moyen de les reconnaître.	Longueur d'ondes en microns.	Caractères du mouvement vibratoire.
Radiation ultra-violette (photographie).....	0,185	Rayon extrême de l'aluminium dans l'étincelle d'induction (Cornu).
	0,295	Extrême limite du spectre solaire au niveau de la mer (Cornu).
Radiation visible (œil).	0,360	Limite de la lumière lavande, visible pour des yeux normaux.
	0,810	Extrême limite de la lumière rouge foncé.
Commencement de l'ultra-rouge (phosphorescence).....	1	Limite extrême possible de longueur d'onde dans l'infra-rouge (Draper).
Action thermique (bolomètre).....	2,7	Limite sensible des rayons solaires qui pénètrent dans l'atmosphère à Allegheny (Langley).
Radiation provenant des sources terrestres (bolomètre).....	5,3	Limite avec prisme de sel gemme.
	7,5	Position approximative du maximum d'une surface noire à 100°.
	11	Surface noire à 0°.
	30	Estimation approximative de la valeur minima de l'onde la plus longue dans une chaleur quelconque avec un prisme de sel gemme.
Vibration sonore (oreille)	14000	Longueur de l'onde la plus courte perceptible (Savart, 48,000 vibrations par seconde).

Ce tableau montre que l'étendue du spectre normal perceptible à l'œil est très restreinte ; cette étendue ne dépasse pas les 15 millièmes du spectre perceptible par les méthodes photographiques et calorimétriques.

Action photométrique de la lumière.

7. Au point de vue photométrique, ce sont les radiations perceptibles à l'œil qui, seules, entrent en ligne de compte. Or, dans l'action calorifique d'un faisceau lumineux, par exemple, toutes les vibrations supérieures à $0,35\mu$ environ contribuent à leur formation, et principalement les vibrations dont la longueur d'onde est supérieure à $0,8\mu$, tandis que ce sont seulement les vibrations comprises entre les deux limites ci-dessus qui agissent sur l'œil.

Il en est de même pour l'action chimique d'un faisceau lumineux ; dans ce cas, ce seront surtout les radiations dont les longueurs d'onde

sont inférieures à 0μ,35 qui produiront la plus grande partie de l'action chimique totale du faisceau.

On voit donc que les phénomènes chimiques ou calorifiques de la lumière ne peuvent pas servir à mesurer son intensité photométrique, d'autant plus que la nature du travail exécuté par le faisceau lumineux dans un corps, travail qui se traduit par une élévation de la température ou par une décomposition chimique, dépend du travail déjà exécuté sur d'autres corps par le même faisceau.

Pour préciser, considérons un faisceau lumineux d'intensité bien déterminée et faisons-lui traverser une solution d'alun ; l'action photométrique du faisceau lumineux n'aura pas varié, pour ainsi dire, tandis que son action calorifique aura été considérablement diminuée.

Si l'on voulait alors comparer l'action photométrique du faisceau lumineux après son passage au travers de la solution d'alun, à celle d'un autre faisceau lumineux n'ayant traversé aucune solution de ce genre, en comparant les actions calorifiques des deux faisceaux on commettrait une erreur énorme.

La même remarque s'applique aux autres phénomènes physiques sur lesquels la lumière a une influence (variation de la résistance électrique du sélénium sous l'influence de la lumière, variation du moment magnétique d'un barreau, décharges actino-électriques, etc.).

L'intensité lumineuse d'un faisceau de lumière diffère essentiellement de l'intensité du mouvement vibratoire définie par la théorie ondulatoire. Au point de vue photométrique, la lumière se traduit par une sensation, par un simple phénomène physiologique. L'intensité lumineuse d'un faisceau de lumière n'est plus l'énergie du mouvement vibratoire de l'éther, mais seulement l'action de cette énergie sur notre organe visuel.

Sensibilité de l'œil pour les observations photométriques.

8. L'œil est donc l'appareil régulateur de toute opération photométrique; c'est le photoscope obligé dans toute comparaison de l'intensité de deux foyers lumineux; l'œil y joue le même rôle que le galvanomètre ou l'électromètre dans les mesures électriques par réduction à zéro. On ne peut donc tolérer dans les mesures photométriques qu'un organe visuel sain et bien conformé. En outre, l'emploi obligatoire de l'œil impose aux mesures photométriques une limite d'exactitude déterminée par sa sensibilité.

Puisque c'est l'œil seulement qui peut apprécier les qualités photométriques d'un faisceau lumineux ou d'un éclairage donné, on ne mesure pas en réalité l'intensité lumineuse d'une source de lumière ou l'intensité d'éclairement d'une surface, mais l'excitation produite sur l'œil et le nerf optique. Or, chacun peut constater que l'organe visuel est incapable de

distinguer si un éclairement vaut m fois ou n fois plus qu'un autre éclairement ; il peut seulement juger que l'un est plus grand que l'autre, mais sans pouvoir estimer leur rapport. Ce fait, vérifié expérimentalement chaque jour, rentre dans les conséquences d'une loi générale qui régit la plus grande partie des sensations. Cette loi, c'est la loi *psychophysique* de Fechner, d'après laquelle l'intensité de la sensation est proportionnelle au logarithme de l'excitation (1).

On sait qu'on appelle, dans toute sensation, *seuil de l'excitation*, la limite inférieure au-dessous de laquelle l'excitation est trop faible pour produire une sensation perceptible ; *la hauteur de l'excitation* est la limite supérieure au-dessus de laquelle une augmentation de l'intensité d'excitation ne produit plus d'augmentation de l'intensité de la sensation.

La valeur de la sensation qui correspond au seuil d'excitation s'appelle la *sensation minima*, celle qui correspond à la hauteur de l'excitation se nomme la *sensation maxima* ; on donne aussi au seuil de l'excitation le nom de *valeur sensible* ou d'*unité physiologique*, car cette quantité est employée comme unité dans les mesures de l'excitation.

Dans le cas où l'on établit l'égalité de deux éclairements, l'unité physiologique est la valeur limite que doit atteindre la différence des deux éclairements pour que cette différence soit perceptible à la rétine.

Pour déterminer cette quantité, on peut par exemple procéder de la manière suivante imaginée par Bouguer : on éclaire un tableau blanc avec deux sources de lumières égales (deux bougies égales), et l'on dispose, en avant du tableau, une tige qui y projette deux ombres (photomètre de Rumford). On éloigne l'une des bougies jusqu'à ce que l'ombre correspondante cesse d'être visible.

Soit a la distance du tableau à la lumière la plus rapprochée, b celle à laquelle se trouve la lumière la plus éloignée ; les intensités d'éclairement produites sur le tableau par ces deux lumières sont entre elles comme $a^2 : b^2$. Bouguer a trouvé $\frac{a}{b} = \frac{1}{8}$, tandis que Fechner est arrivé à $\frac{a}{b} = \frac{1}{10}$; il en résulte donc que Bouguer pouvait distinguer 1/64 de l'intensité lumineuse et Fechner 1/100. Arago a observé que, dans le mouvement, on peut remarquer des différences encore plus petites, et il a trouvé ainsi 1/131. Enfin, Helmholtz a pu constater des différences d'éclairement de 1/133 entre des cercles concentriques d'un disque et par moment des différences de 1/150 et même de 1/167.

Le disque était alors éclairé par la lumière diffuse d'un jour clair. En éclairant le disque par la lumière directe du soleil, la perception des différences d'éclairement devenait plus difficile. La valeur sensible dans la comparaison de deux éclairements dépend de l'intensité des éclaire-

(1) Helmholtz, *Optique physiologique*, p. 415.

ments ou des lumières que l'on considère ; elle est maximum pour une valeur moyenne, plus petite lorsque les éclairements sont très intenses ou très faibles.

Ainsi Masson a trouvé que la valeur sensible (seuil de l'excitation) était maximum lorsque les intensités lumineuses à comparer étaient de l'ordre de la lumière diffuse du jour ; il a obtenu dans ces conditions une valeur de 1/186 pour la valeur du seuil de l'excitation, c'est-à-dire qu'il pouvait encore distinguer des différences d'éclairement de 1/186.

La conclusion pratique qui résulte de ce fait est qu'il faut, dans les comparaisons photométriques, s'arranger de manière à n'avoir à comparer que des éclairements dont l'intensité se rapproche de la valeur de l'éclairement produit par la lumière diffuse du jour.

Ce qui précède montre encore que l'œil est incapable d'apprécier à plus de 0,01 près l'égalité d'éclairement de deux surfaces contiguës, même lorsque les teintes que l'on compare sont identiques comme dans les mesures indiquées ci-dessus. Ce fait limite l'exactitude des mesures photométriques.

A partir du moment où la différence d'intensité des deux lumières (ou la différence d'éclairement des deux surfaces) a dépassé la valeur sensible correspondant à l'observateur et aux conditions de l'expérience, l'intensité de la sensation varie alors suivant la loi psychophysique de Fechner, vérifiée par les nombreuses mesures de E.-H. Weber. D'après ces mesures, l'accroissement de sensation dS est proportionnel au rapport entre l'accroissement de l'excitation dI et l'excitation primitive I, c'est-à-dire :

$$dS = k\frac{dI}{I},$$

ou, en intégrant :

$$S = k \log (I) + C.$$

La sensation S est nulle pour une intensité d'excitation égale à la valeur sensible I_0 ; on a donc :

$$C = k \log (I_0)$$

et par conséquent :

$$S = k \log \left(\frac{I}{I_0}\right).$$

Cette formule, qui exprime la loi psychophysique de Fechner, montre donc que lorsque l'intensité de l'excitation lumineuse (éclairement) passe d'une valeur donnée à une valeur m fois plus grande, la sensation augmente dans le rapport de α à $(\alpha + \log. m)$.

Ces faits expliquent clairement pourquoi l'œil ne peut pas apprécier avec exactitude le rapport des deux sensations lumineuses produites par deux sources différentes, mais seulement leur égalité.

Variations de la sensibilité de l'œil avec la couleur de la lumière.

9. La sensibilité de l'œil varie avec la nature du faisceau lumineux ; les chiffres qui précèdent, relatifs à la valeur sensible de l'organe visuel de quelques observateurs, se rapportent tous à la lumière blanche, mais cette valeur sensible n'est plus la même si la nature des radiations lumineuses du faisceau varie.

On possède peu de renseignements précis sur les valeurs relatives du seuil d'excitation pour les différentes régions du spectre.

Voici cependant les valeurs obtenues par M. Ebert (1) (E, et par son assistant S) à l'aide d'une méthode permettant d'obtenir une assez grande précision.

Le tableau ci-dessous renferme les valeurs relatives du seuil de l'excitation, pour cinq régions du spectre : elles sont renfermées dans la première double colonne.

Couleur.	Longueur d'onde en μ.	Seuil de l'excitation relatif.		Seuil de l'excitation ramené à la même énergie du mouvement vibratoire.	
		E.	S.	E.	S.
Rouge.....	0,675	0,8	0,6	34	25
Jaune.....	0,590	2,3	2,0	17	15
Vert.....	0,530	0,5	0,5	1	1
Vert bleuâtre....	0,500	1,2	0,8	2	1,3
Bleu.....	0,470	7,3	6,8	4	3

Ces valeurs ont été obtenues à l'aide d'un bec de gaz Argand. Pour les ramener à ce qu'elles seraient en partant du spectre normal du soleil, il suffit de tenir compte des mesures de l'énergie relative des diverses régions du spectre solaire faites par Langley, par exemple, et des mesures de l'énergie du spectre d'un bec de gaz faites par M. O.-E. Meyer. On obtient ainsi les nombres de la troisième colonne double : la sensibilité de l'excitation est alors donnée par l'inverse du seuil.

Ce tableau montre que la sensibilité de l'excitation lumineuse est maximum pour le vert et minimum pour le rouge. Par conséquent, l'énergie du mouvement vibratoire qui contribue à la production d'une sensation lumineuse est maximum lorsque la longueur d'onde est celle des radiations de la région verte du spectre, c'est-à-dire voisine de 0,530 micron.

Ces conclusions ont été confirmées par des recherches très précises de Langley (2) sur l'énergie de la vision dans les différentes régions du spectre solaire normal. Le savant physicien a trouvé également que la même

(1) *Ann. de Wiedemann*, vol. XXXIII, p. 138. *Lum. él.*, vol. XXVII, p. 139.
(2) *Lum. El.*, vol. XXXI, p. 144.

quantité d'énergie du mouvement vibratoire produit dans le vert une impression dix millions de fois plus forte que celle qui serait produite dans le rouge (0,75 μ).

Voici, d'ailleurs, les chiffres obtenus qui représentent la sensation lumineuse produite par la même quantité d'énergie dans les diverses régions du spectre ; la sensation lumineuse produite dans le rouge (0,75 μ) est prise comme unité.

	Violet.	Bleu.	Vert.	Jaune.	Orangé.	Rouge.	Rouge sombre.
Longueur d'onde en μ....	0,400	0,470	0,530	0,580	0,600	0,650	0,750
Sensation lumineuse.....	1600	62000	100000	28000	14000	1200	1

Composition de la lumière émise par les foyers lumineux.

10. Un corps qu'on chauffe émet des radiations, c'est-à-dire détermine un mouvement vibratoire de l'éther, dont la nature dépend de sa température. Avec Draper on admettait jusqu'à ces dernières années que tous les corps commencent à émettre des radiations perceptibles à l'œil lorsque leur température atteint 525° et que ces radiations sont celles de la partie rouge extrême du spectre normal, c'est-à-dire celles dont la longueur d'onde est le plus faible.

Il y a quelques années, M. H.-F. Weber (1) a observé que l'émission de la lumière d'un corps solide porté à une température élevée commence déjà avant qu'il ne devienne incandescent. La première trace de lumière sensible dans le spectroscope est une bande de lumière grise et brumeuse qui se produit dans la région du spectre correspondant aux radiations jaunes et vert jaunâtres. Si la température augmente, le spectre des radiations émises par le corps chauffé augmente des deux côtés de cette bande grise. M. Weber a constaté la première trace de lumière pour une température de 417° avec l'or, pour 390° avec le platine et pour 377° avec le fer.

Ce phénomène s'explique facilement d'après ce que nous avons vu plus haut sur la sensibilité de l'œil dont le maximum a lieu pour les radiations vertes; la première radiation lumineuse émise par une source radiante peu énergique doit partir de cette région du spectre.

A partir de la température pour laquelle on perçoit les premières radiations, l'éclat lumineux du corps incandescent augmente très rapidement avec la température. Aux radiations jaunes et jaunes verdâtres s'ajoutent des radiations de longueur d'onde plus grandes et plus petites, et lorsque l'incandescence complète est atteinte, l'adjonction des radiations de grande réfrangibilité se fait très rapidement.

Le spectre de la lumière émise par un corps porté à une température

(1) *Monatsber. der Berliner Acad.*, vol. VI, p. 565. *Lum. él.*, vol. XXX, p. 31.

de 720° comprend par exemple toutes les couleurs, jusqu'au rouge orange (de la raie A à la raie C); à 780° il s'étend jusqu'à l'orange clair (G), et à 1156° il comprend tout le spectre entre A et H. Au-dessus de 1165° les radiations ultra-violettes non perceptibles à l'œil viennent s'ajouter aux radiations précédentes.

Voici, par exemple, les valeurs obtenues par M. Violle (1) pour l'intensité lumineuse de quatre radiations différentes émises par un disque de platine porté à des températures élevées; l'unité adoptée pour chaque radiation est l'intensité de la radiation correspondante émise par le platine à sa température de fusion.

TEMPÉRATURE.	λ = 656 (C)	λ = 589,2 (D)	λ = 536 (E = 527)	λ = 482 (F = 416)
775°	0,00038	0,00007	0,00003	»
954	0,00197	0,00124	0,00073	»
1045	0,00645	0,00450	0,00271	0,00133
1500	0,303	0,271	0,225	0,155
1775	1,000	1,000	1,000	1,000

Si l'on prend pour unité d'intensité de chaque radiation l'intensité des radiations correspondantes de la flamme de la lampe carcel, on obtient le tableau suivant :

TEMPÉRATURE	λ = 656	λ = 489,2	λ = 536	λ = 482
775°	0,00300	0,00060	0,00030	»
954	0,01541	0,01105	0,00715	»
1045	0,0505	0,0402	0,0265	0,0162
1500	2,371	2,417	2,198	1,894
1775	7,820	8,932	9,759	12,16

Ces deux tableaux montrent avec quelle rapidité l'intensité lumineuse augmente lorsque la température s'élève. Par exemple, l'intensité des radiations dont la longueur d'onde est de 0,589 μ est plus de 1000 fois plus grande à la température de fusion du platine (1775°) qu'à celle de fusion de l'argent (954°).

Le second tableau permet de voir combien les radiations réfrangibles émises par le platine incandescent sont plus intenses que celles de la lampe carcel.

Plus la température s'élève, plus les radiations de faible longueur d'onde deviennent intenses. Si la température est peu élevée, les radiations de

(1) *Comptes rendus*, LXXXVIII, p. 171 et XCII, p. 866.

grande longueur d'onde l'emportent et la lumière paraît rouge. Pour que la lumière ait la couleur blanche de celle du soleil, il faut que les intensités des radiations des différentes longueurs d'onde soient dans le même rapport que dans le spectre solaire normal. Si les radiations rouges sont plus intenses, la lumière paraît rouge, tandis qu'elle paraît violette si les radiations violettes sont plus intenses que dans le spectre normal.

Voici, par exemple, les valeurs obtenues par M. Crova (1) pour l'intensité lumineuse des radiations de même longueur d'onde émises par des foyers lumineux différents, l'intensité lumineuse pour la longueur d'onde $\lambda = 0,676\ \mu$ étant prise comme unité (1000).

Longueur d'onde.	0,676μ	0,605μ	0,560μ	0,523μ	0,486μ	0,459μ
Arc voltaïque.....	1000	707	597	506	307	228
Lumière Drummond ...	1000	573	490	299	168	73
Lampe carcel.....	1000	442	296	166	80	17

Ces valeurs montrent que l'intensité des radiations rouges est près de soixante fois plus forte que celle des radiations violettes dans la lumière de la lampe carcel, tandis que, dans la lumière de l'arc voltaïque, ce nombre est égal à quatre seulement, soit quinze fois moindre. Chacun sait, d'ailleurs, que la flamme de la lampe carcel paraît rougeâtre à côté de l'arc voltaïque.

En prenant l'intensité des radiations de la lampe carcel comme unité, M. W. Pickering (2) a obtenu les valeurs suivantes pour l'intensité de quelques radiations de différents foyers lumineux.

Raies du spectre.	C	D	b'	Entre F et G
Bougie.....	73	100	104	134
Bec de gaz.....	74	100	103	125
Arc voltaïque.....	61	100	121	735

M. O.-E. Meyer (3), enfin, a obtenu les valeurs suivantes en prenant comme unités les radiations émises par un bec de gaz et en rendant égales les intensités correspondant à la raie D.

Raies du spectre.	B	D	E	G
Lampe à pétrole.....	0,66	1,00	1,40	1,00
Lumière solaire directe.....	4,07	1,00	0,43	0,15
— — diffuse.....	1,25	1,00	0,50	0,41
Arc voltaïque.....	1,10	1,00	0,40	0,10
Lampe à incandescence.....	0,30	1,00	1,40	1,10

Les résultats ci-dessus sont suffisants pour permettre de classer les foyers lumineux d'après la nature de la lumière qu'ils émettent. Les unités n'étant pas les mêmes dans les tableaux qui précèdent, on ne peut pas comparer directement les valeurs qu'ils renferment. On peut cepen-

(1) *Comptes rendus*, vol. LXXXVII, p. 322.
(2) *Nature*, vol. XXV, p. 340.
(3) *Monatsber. der Berliner Acad.*, 1880.

dant constater que les foyers lumineux usuels peuvent se classer comme suit, au point de vue de la qualité de la lumière émise : lampe carcel, bougie, bec de gaz, lampe à pétrole, platine incandescent, lumière Drummond, arc voltaïque, lumière solaire.

Éléments photométriques des foyers lumineux.

11. *Définitions.* — L'intensité d'un foyer varie en général avec la direction des rayons lumineux. Pendant longtemps on s'est borné à ne considérer que l'intensité lumineuse dans un plan horizontal passant par le centre du

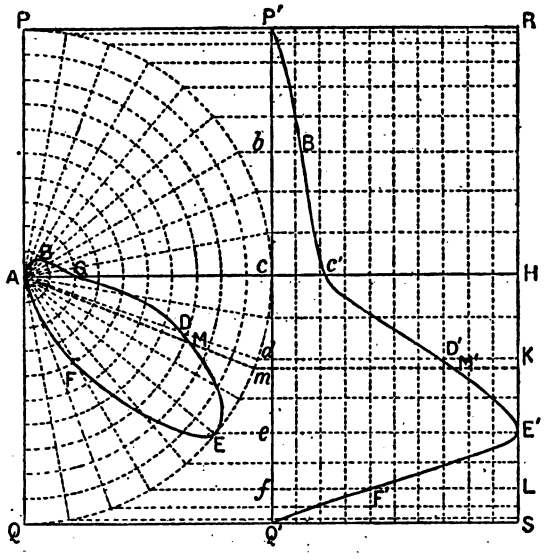


Fig. 3.

foyer, c'est-à-dire l'*intensité lumineuse horizontale*; le développement de l'éclairage par les becs intensifs et par l'arc voltaïque a forcé de serrer le problème de plus près et d'introduire de nouveaux facteurs dans l'étude d'un foyer. C'est ainsi qu'on a introduit la notion d'*intensité moyenne sphérique* qui joue un rôle considérable dans la comparaison des qualités photométriques des foyers lumineux.

Si l'on porte sur les diverses directions passant par le foyer lumineux des longueurs mesurant les intensités des rayons émis dans ces directions, le lieu des points ainsi obtenus forme une surface qu'on appelle la *surface photométrique* du foyer.

Dans les lampes à arc, par exemple, la surface photométrique peut être considérée en général comme étant de révolution autour de l'axe

commun des deux charbons, bien que dans beaucoup de cas cette condition ne soit pas parfaitement remplie par suite des défauts d'homogénéité dans les charbons et des défauts de centrage.

Le méridien de la surface photométrique a une forme bien déterminée. Pour le construire on mesure l'intensité lumineuse pour des inclinaisons assez rapprochées dans des azimuts différents. On choisit en général des inclinaisons variant de 10 en 10 degrés et quatre azimuts différant de 90 degrés. On admet alors comme intensité lumineuse, sous une inclinaison donnée, la moyenne des valeurs obtenues pour cette inclinaison dans les quatre azimuts. Pour la construction de la courbe, on prend comme unité d'intensité lumineuse l'intensité lumineuse maximum. La construction graphique est simplifiée en employant un canevas préparé à l'avance, formé de circonférences concentriques décrites du point A comme centre, ayant respectivement pour rayons 0,1 — 0,2 — 0,3, etc., la longueur AP étant prise comme unité; et de droites menées par le point A et faisant des angles de 10 degrés..., 20 degrés, au-dessus et au-dessous de l'horizon AH. Sur ces droites on porte l'intensité lumineuse correspondante en fonction de l'intensité maximum AE, prise somme unité. La ligne ABCDEF passant par les points ainsi déterminés est la courbe méridienne de la surface photométrique du foyer; elle permet d'apprécier rapidement quelle est l'intensité relative dans une direction donnée, AD par exemple.

12. *Intensité moyenne horizontale.* — L'intensité moyenne horizontale d'un foyer est la moyenne des valeurs de l'intensité, mesurée dans toutes les directions du plan horizontal passant par le foyer. Pratiquement, il suffit de faire ces mesures dans un certain nombre de directions symétriques et d'en calculer la moyenne.

Si l'on coupe la surface photométrique d'un foyer par un plan horizontal passant par le foyer, la courbe d'intersection représente les variations de l'intensité horizontale. L'intensité moyenne horizontale représente alors le rayon d'un cercle dont la surface est égale à celle qui est limitée par la courbe d'intersection précédente. Pour déterminer pratiquement l'intensité moyenne horizontale d'un foyer, il suffit de faire des mesures dans un petit nombre de directions différentes, quatre ou huit par exemple, disposées symétriquement.

13. *Intensité moyenne sphérique.* — L'intensité moyenne sphérique peut être définie comme étant la somme des éclairements reçus par une sphère de rayon 1, concentrique au foyer, divisée par la surface de la sphère. En d'autres termes, c'est l'intensité du foyer rendu uniforme, c'est-à-dire émettant des radiations lumineuses d'intensité constante, dans toutes les directions.

Dans le calcul de l'intensité moyenne sphérique on admet généralement que la surface photométrique est une surface de révolution ; par

conséquent l'intensité lumineuse I est indépendante de l'azimut et ne varie qu'avec l'inclinaison du rayon ; cette intensité est donc une fonction de l'inclinaison θ sur l'horizon, par conséquent

$$i = f(\theta).$$

L'intensité totale sera donc égale à la moyenne des intensités partielles relatives à chaque direction. Pour effectuer cette moyenne considérons la partie de la surface photométrique comprise entre les deux parallèles définies par les angles θ et $\theta + d\theta$. Ces deux angles étant très voisins, on peut supposer l'intensité i constante. La quantité de lumière qui tombe sur cette zone de la surface photométrique est égale à celle que reçoit la zone correspondante de la sphère unité. Or la hauteur de cette zone étant $\cos\theta\, d\theta$, sa surface est égale à $2\pi \cos\theta\, d\theta$, et la quantité de lumière qu'elle reçoit est donnée par l'expression $2\pi i \cos\theta\, d\theta$. Par conséquent, la quantité totale de lumière reçue par une zone de la surface photométrique et la zone correspondante de la sphère est égale à $\int_{\theta_1}^{\theta_2} 2\pi i \cos\theta\, d\theta$, θ_1 et θ_2 étant les inclinaisons relatives aux parallèles qui limitent la zone. L'intensité d'éclairement moyen de la zone sera donc égale à la quantité totale de lumière reçue divisée par la surface, c'est-à-dire à

$$\frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} 2\pi i \cos\theta d\theta}{2\pi(\cos\theta_2 - \cos\theta_1)}.$$

L'intensité moyenne sphérique est égale à l'intensité de l'éclairement moyen de la sphère unité, c'est-à-dire à la quantité totale de lumière reçue par la sphère unité, divisée par la surface de celle-ci ; par conséquent

$$\frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} 2\pi i \cos\theta d\theta}{4\pi}.$$

Dans la pratique, la loi suivant laquelle l'intensité varie avec l'inclinaison n'est pas assez simple pour qu'on puisse effectuer l'intégration directement. On est forcé de l'effectuer par approximation ; le calcul est simplifié par l'emploi d'une courbe qui se déduit immédiatement de la courbe méridienne de la surface photométrique, de la manière suivante.

14. *Calcul de l'intensité moyenne sphérique.* — Pour obtenir les différents points de cette courbe (fig. 3), il suffit de mener, par les points où les prolongements des rayons AB, AC, AD, etc., rencontrent la circonférence, des horizontales et de prendre sur ces droites, à partir de leur rencontre avec la perpendiculaire P′ Q′ menée à une distance 1 du point A, des longueurs égales à celles des rayons vecteurs qui mesurent les intensités

relatives ; on a donc $bB' = AB$, $cC' = AC$, etc. On peut faciliter la construction en employant un canevas tracé à l'avance (1).

La longueur dm, correspondant sur la droite P′ Q′ aux inclinaisons θ et $\theta + d\theta$, est égale à $\cos\theta\, d\theta$, et la longueur dD' est égale à l'intensité i ; par conséquent la surface dm M′D′ est égale à $i \cos\theta\, d\theta$, et par suite le produit de cette surface par 2π représente la quantité de lumière reçue par la zone correspondant à $d\theta$. Il en résulte que la surface entière P′C′E′Q′ est égale à $\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} i \cos\theta\, d\theta$ et qu'elle représente, multipliée par 2π, la quantité totale de lumière reçue par la sphère unité. L'intensité moyenne sphérique étant égale à $2\pi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} i \cos\theta\, d\theta$ divisé par la surface de la sphère (4π), est ainsi donnée par l'expression $\frac{\text{surface P'C'E'Q.}}{2}$ Or, la surface du rectangle P′RSQ est égale à 2, en sorte que l'intensité moyenne sphérique est le rapport de la surface P′C′E′Q à la surface P′RSQ′.

La détermination de l'intensité moyenne sphérique peut donc être faite graphiquement : il suffit d'évaluer la surface P′C′E′Q′ à l'aide d'un planimètre, par exemple.

On peut aussi se dispenser d'avoir recours à une détermination graphique en effectuant les calculs de la manière suivante. On remplace la courbe méridienne de la surface photométrique par une ligne polygonale ayant comme sommets les points déterminés directement par l'observation, ce qui revient à regarder l'intensité lumineuse moyenne de chaque zone comme étant égale à la moyenne arithmétique des intensités i' et i'' correspondant aux inclinaisons θ' et θ'' des cercles de base de la zone ; la quantité de lumière reçue par cette dernière est donc

$$2\pi h . \frac{i' + i''}{2} = 2\pi(\sin\theta' - \sin\theta'') . \frac{i' + i''}{2}$$

En effectuant les mesures sous les angles θ_1, θ_2, θ_3.... θ la quantité de lumière reçue par la zone totale $\theta_1\theta_n$ est égale à

$$2\pi\left[(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)\frac{i_1 + i_2}{2} + (\sin\theta_3 - \sin\theta_2)\frac{i_2 + i_3}{2} + \ldots + (\sin\theta_n - \sin\theta_{n-1}(\frac{i_{n-1} + i_n}{2}\right].$$

La surface de cette zone étant égale à $2\pi(\sin\theta_n - \sin\theta_1)$, l'intensité moyenne correspondante est égale à

$$\frac{(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)\frac{i_1 + i_2}{2} + \ldots\ldots + (\sin\theta_n - \sin\theta_{n-1})\frac{i_{n-1} + i_n}{2}}{\sin\theta_n - \sin\theta_1}.$$

(1) *Comptes rendus des essais photométriques à l'exposition d'Anvers*, en 1885, par M. Rousseau.

En supposant $\theta_1 = -\frac{\pi}{2}$ et $\theta_n = +\frac{\pi}{2}$, on obtient l'intensité moyenne sphérique ; le dénominateur est alors égal à 2.

La connaissance de la répartition exacte de la lumière dans l'hémisphère supérieur n'a qu'une importance restreinte au point de vue de l'éclairement ; c'est surtout le cas pour les foyers à arc voltaïque. C'est pourquoi il suffit de déterminer l'intensité lumineuse de 30 en 30 degrés dans l'hémisphère supérieur. Dans ce cas, la formule qui donne l'intensité hémisphérique moyenne (hémisphère supérieur) devient

$$\frac{\sin 30^\circ - \sin 0^\circ}{4}(i'_1 + i'_2) + \frac{\sin 60^\circ - \sin 30^\circ}{4}(i'_2 + i_3) + \frac{\sin 90^\circ - \sin 60^\circ}{5}(i'_3 + i'_4).$$

Dans les lampes à arc i'_4 est nul (intensité dans la direction verticale) et la formule peut s'écrire

$$0{,}1250(i'_1 + i_2) + 0{,}0915(i'_2 + i_3) + 0{,}3335 i_4.$$

En admettant une différence de 10 degrés pour les mesures dans l'hémisphère inférieur, la formule de l'intensité moyenne hémisphérique devient

$$\frac{\sin 10^\circ - \sin 0^\circ}{4}(i_1 + i_2) + \frac{\sin 20^\circ - \sin 10^\circ}{4}(i_2 + i_3) + \ldots\ldots$$

ou

$$0{,}0434(i_1 + i_2) + 0{,}0421(i_2 + i_3) + 0{,}0395(i_3 + i_4) + 0{,}357(i_4 + i_5) + 0{,}308(i_5 + i_6) + 0{,}250(i_6 + i_7) + 0{,}0184(i_7 + i_8) + 0{,}0151 i_8.$$

Si l'on veut réduire le nombre des mesures de 9 à 6 (l'intensité en direction verticale étant nulle), il suffit de faire les mesures de 15 en 15 degrés. On a alors pour l'intensité hémisphérique moyenne :

$$\frac{\sin 15^\circ - \sin 0^\circ}{4}(i_1 + i_2) + \frac{\sin 30^\circ - \sin 15^\circ}{4}(i_2 + i_3) + \ldots\ldots$$

ou

$$0{,}0641(i_1 + i_2) + 0{,}0603(i_2 + i_3) + 0{,}0674(i_3 + i_4) + 0{,}0397(i_4 + i_5) + 0{,}0250(i_5 + i_9) + 0{,}0085 i_6.$$

Le mode de calcul qui précède a été employé par M. Rousseau lors des mesures photométriques de l'exposition d'Anvers. Il offre de grands avantages. Quelques praticiens lui préfèrent cependant le procédé suivant.

La quantité de lumière reçue par la zone $\theta_1\theta_2$ est égale à

$$2\pi \int_{\theta_1}^{\theta_2} i \cos\theta d\theta = 2\pi \int_{\theta_1}^{\theta_2} y d\theta$$

en posant $y = i \cos\theta$. On peut remplacer avec une approximation suffisante l'intégrale ci-dessus par l'expression $\frac{y_1 + y_2}{2}$, à condition que θ_1 et

θ_2 soient suffisamment rapprochés, et en supposant $y_1 = i_1 \cos\theta_1$ et $y_2 = i_2 \cos\theta_2$.

En admettant que les angles θ_1, θ_2, θ_3,... θ_n soient également espacés, c'est-à-dire $\theta_1 - \theta_2 = \theta_2 - \theta_3$, etc., $= \Delta\theta$, la quantité de lumière reçue par la zone totale $\theta_1\theta_n$ est donnée par l'expression

$$\pi(y_1 + 2y_2 + 2y_3 + \ldots + 2y_{n-1} + y_n)\Delta\theta.$$

L'intensité moyenne correspondant à cette zone est

$$\frac{y_1 + 2y_2 + 2y_3 + \ldots + 2y_{n-1} + y_n}{2(\sin\theta_n - \sin\theta_1)} \cdot \Delta\theta$$

et l'intensité moyenne sphérique devient

$$(y_1 + 2y_2 + 2y_3 + \ldots + 2y_{n-1} + y_n)\frac{\Delta\theta}{4}.$$

Enfin, un troisième procédé, employé à l'Exposition d'électricité de Paris en 1881, consiste à diviser la sphère unité en zones horizontales suffisamment étroites et à multiplier la surface de chacune de ces zones par l'intensité lumineuse du rayon qui correspond à son parallèle moyen. Le produit ainsi obtenu, divisé par la surface de la sphère (4π), est égal à l'intensité moyenne sphérique du foyer.

CHAPITRE II

LES PHOTOMÈTRES

15. Les photomètres sont des appareils qui permettent de comparer les intensités lumineuses de deux sources de lumière données ; ils reposent sur le principe suivant : faire varier d'une manière continue et déterminée les éclairements produits sur une surface donnée, par les deux luminaires, jusqu'à ce que ces éclairements soient égaux.

Ce principe fondamental qui est à la base de tout photomètre est une conséquence immédiate du fait (§ **8**) que l'œil apprécie, avec le maximum d'exactitude, l'égalité des éclairements de deux surfaces, tandis que l'exactitude avec laquelle cet organe peut déterminer le rapport de deux éclairements est absolument illusoire.

L'égalité des éclairements que l'on compare peut être obtenue de plusieurs manières différentes, savoir :

A. Par l'application de la loi photométrique fondamentale, c'est-à-dire en variant la distance ou l'inclinaison des surfaces dont on veut égaliser les éclairements ;

B. Par des méthodes de diaphragmation et de dispersion ;

C. Par des méthodes basées sur les propriétés de la lumière polarisée, et par des méthodes de mélange des lumières des sources que l'on compare ;

D. Par des méthodes basées sur l'acuité visuelle.

La plupart des photomètres peuvent rentrer dans l'une de ces quatre catégories, bien que la disposition et la construction des organes, aussi bien que la manière dont l'égalité des deux éclairements est constatée, varient considérablement d'un appareil à l'autre.

E. Outre ces photomètres, il faut mentionner ceux qui reposent sur des actions diverses de la lumière et qui ne sont pas susceptibles de rentrer dans l'une des catégories précédentes.

F. Il faut enfin ajouter aux photomètres usuels, destinés à la comparaison de l'intensité totale des foyers lumineux, ceux qui sont combinés aux spectromètres de manière à permettre les comparaisons photométriques des diverses régions des spectres des deux sources à étudier.

A. — PHOTOMÈTRES BASÉS SUR LA LOI PHOTOMÉTRIQUE FONDAMENTALE.

16. On sait que l'intensité d'éclairement produit sur un élément de surface est donnée par la formule

$$e = \frac{I \cos i}{d},$$

I étant l'intensité de la source lumineuse, d la distance de celle-ci à l'élément, i l'angle d'incidence du rayon lumineux sur l'élément.

On peut modifier l'éclairement en faisant varier la valeur de d ou celle de i. Si l'on modifie la distance seulement en admettant, par exemple, que les rayons lumineux rencontrent l'écran sous la même incidence, on obtient des photomètres basés sur la loi de la distance. Si la distance reste constante, et si l'on ne fait varier que l'incidence i, on obtient les photomètres basés sur la loi de l'inclinaison.

17. Dans tous les photomètres basés sur la loi des distances, l'inclinaison sous laquelle les rayons lumineux des deux sources que l'on compare tombent sur la surface dont il s'agit de constater l'éclairement uniforme est constante; ce qui varie, c'est la distance de cette surface aux deux foyers lumineux.

Par conséquent, l'organe essentiel et commun à tous ces photomètres est une ou deux règles divisées sur lesquelles on déplace les deux foyers ou la surface témoin. Dans la majorité des cas, on s'arrange pour que les deux foyers et l'écran soient en ligne droite; le tout est alors monté sur un banc d'optique.

Photomètre de Lambert (Rumford).

18. Ce photomètre, imaginé en 1760, et employé pour la première fois par Lambert, porte généralement le nom de Rumford, parce que ce physicien anglais en a fait un usage assez prolongé au commencement de ce siècle.

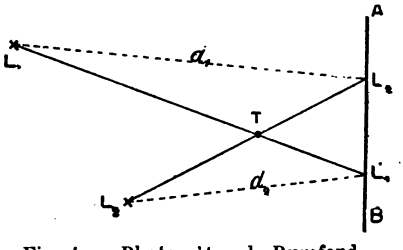


Fig. 4. — Photomètre de Rumford.

Soient L_1 et L_2 les deux luminaires (fig. 4) dont on veut comparer les intensités lumineuses I_1 et I_2. T une tige opaque, et B un écran blanc vertical. Le luminaire L_1 projette en L_1' une ombre de la tige T qui n'est éclairée que par le luminaire L_2, tandis que l'ombre L_2', déterminée par ce dernier, n'est illuminée que par L_1. En déplaçant convenablement les luminaires L_1 et L_2, on parvient à obtenir le même éclairement en L_1' et et L_2' ; l'œil accuse

avec netteté le moment où cette condition est remplie. On mesure alors les distances d_1 et d_2 de L_1 et de L_2 à l'écran, et on a la relation :

$$\frac{I_1}{d_1^2} = \frac{I_2}{d_2^2}.$$

Généralement, les deux luminaires sont déplacés sur une règle divisée, perpendiculaire à l'écran, ou d'une manière quelconque; on néglige alors la loi de l'inclinaison qui exige, pour que la loi des distances soit exacte, que l'inclinaison soit constante; on peut tenir compte de cette dernière et l'on trouve, par exemple, que si L_1 reste fixe, le luminaire L_2 doit se déplacer sur une courbe dont on peut étudier la forme s'il y a lieu. Mais le peu d'exactitude du photomètre de Rumford rend cette correction illusoire.

Dans la pratique, si l'on veut avoir rapidement l'intensité à 10 ou 15 p. 100 près, par exemple, d'une source lumineuse, le photomètre de Rumford est très précieux en ce que son installation est des plus rudimentaires, mais il ne peut pas avoir la prétention de donner des résultats rigoureusement exacts.

Photomètre de Bouguer.

19. Ce photomètre (1) (fig. 5) est le plus ancien. L'écran AB est partagé en deux parties égales par une cloison cc' normale à la surface éclairée. L'un des luminaires L_1 éclaire la moitié CA de l'écran, tandis que l'autre L_2 éclaire l'autre moitié CB; afin d'établir l'égalité d'éclairement des deux moitiés de l'écran, on peut déplacer les deux luminaires sur des règles divisées, perpendiculaires à l'écran.

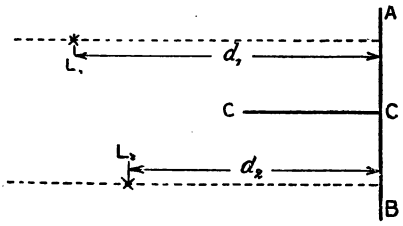


Fig. 5. — Photomètre de Bouguer.

Le plus souvent un des luminaires, L_1 par exemple, est fixe, l'autre seul est mobile.

On remplace généralement l'écran opaque par un écran semi-transparent, un verre dépoli ou une feuille de papier, par exemple; on observe alors l'égalité d'éclairement des deux moitiés de l'écran en se plaçant du côté opposé aux luminaires.

Photomètre de Foucault.

20. Le photomètre de Foucault n'est qu'une simple modification du photomètre de Bouguer. La paroi séparatrice c ne va pas jusqu'à l'écran,

(1) Bouguer, *Essai d'optique*. Paris, 1729. — Id., *Traité d'optique sur la gradation de la lumière*. Paris, 1760.

mais peut être déplacée à volonté par un réglage spécial, de manière à réduire à une simple ligne l'ombre qui sépare les deux moitiés de l'écran éclairées, l'une par L_1, l'autre par L_2.

Pour faire le pointé photométrique, on déplace l'un des luminaires jusqu'au moment où l'éclairement de l'écran opalescent est aussi uniforme que possible, ce qu'on constate en se plaçant derrière l'écran, et en pointant directement à travers un tube M, ou même à l'aide d'une lunette.

Les rayons lumineux des deux foyers ne tombent pas toujours normalement sur l'écran ; mais il faut avoir soin qu'ils arrivent constamment sous la même inclinaison, afin que le facteur cos i soit constant.

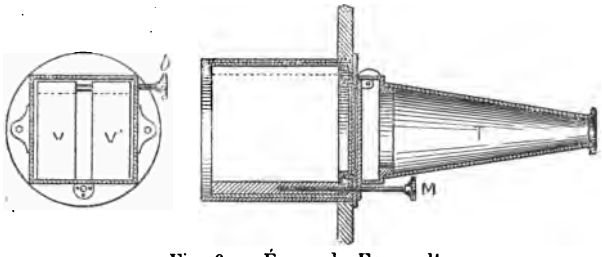


Fig. 6. — Écran de Foucault.

La figure 6 donne une coupe de l'écran de Foucault tel qu'il est généralement employé ; le bouton M sert à déplacer la cloison séparatrice.

La figure 7 représente l'installation complète d'un banc photométrique muni d'un écran de Foucault. L'étalon (lampe carcel) est placé à droite, à la distance fixe de 1 mètre ; le foyer qu'on étudie est monté sur une pièce mobile le long d'une règle divisée ; cette pièce mobile est commandée par une manivelle placée à portée de l'observateur.

La figure 8 représente un modèle simplifié du photomètre de Foucault tel que le construit la Compagnie continentale pour la fabrication des compteurs à gaz, à Paris. L'écran est placé dans une boîte fixée sur un pied à la partie antérieure de l'appareil.

Cette disposition du photomètre de Foucault présente un désavantage relativement considérable : il faut que les deux luminaires soient placés du même côté de l'écran. On peut supprimer facilement cet inconvénient à l'aide de l'arrangement imaginé par Ritchie (fig. 9) et dans lequel un miroir angulaire $m_1 m_2$ renvoie sur l'écran AB les rayons lumineux provenant des deux sources. Ces miroirs étant à angle droit, la lumière qui vient de L_1 et de L_2 est renvoyée normalement sur la face de l'écran.

La figure 10 montre les détails du photomètre employé par M. Violle dans ses recherches sur l'étalon absolu de lumière (1).

(1) *Lum. él.*, vol. XXXIV, p. 52.

Les volets de la cage photométrique sont ouverts sur le côté pour laisser voir les organes intérieurs.

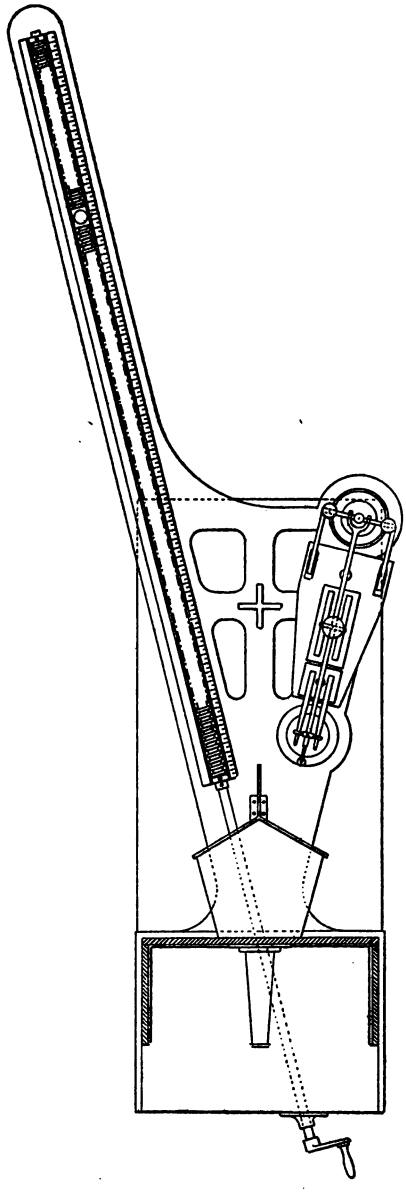


Fig. 7. — Banc photométrique et écran de Foucault.

Les volets latéraux sont percés d'une ouverture circulaire pour le passage des rayons lumineux. Deux volets antérieurs, dont un seul est figuré sur le dessin, empêchent la lumière des deux foyers d'arriver jusqu'à l'observateur.

L'écran E est placé à l'extrémité du tube de la lunette qui sert à l'observateur à vérifier l'égalité d'éclairement des deux plages de l'écran. Les deux miroirs M et M′ sont fixés par deux plaques métalliques sur une grande roue dentée R, commandée par la manivelle *m* qui agit sur l'axe *a* et la roue dentée *r*. Ces organes servent à retourner les miroirs, c'est-à-dire à substituer au miroir M le miroir M′, et réciproquement, afin d'éliminer l'erreur résultant des différences dans les coefficients d'absorption et de réflexion des deux miroirs.

Pour effectuer ce mouvement, il suffit de tourner la manivelle *m* jusqu'à ce que la roue R ait tourné de 180 degrés, ce qui est d'ailleurs indiqué par deux arrêts.

La figure montre en outre la construction du banc photométrique sur lequel l'écran se déplace à la main, grâce à un petit chariot mobile sur deux rails.

L'observateur constatant, par l'égalité des clartés des deux plages de l'écran, l'égalité des éclairements produits par les deux sources lumineuses qu'il compare, il faut

que ces deux teintes soient entre elles comme les deux éclairements qui les produisent. Or la clarté de l'écran dépend des coefficients d'absorption, de réflexion et de transparence de la plaque opalescente.

Pour que l'égalité des clartés des deux moitiés de l'écran corresponde

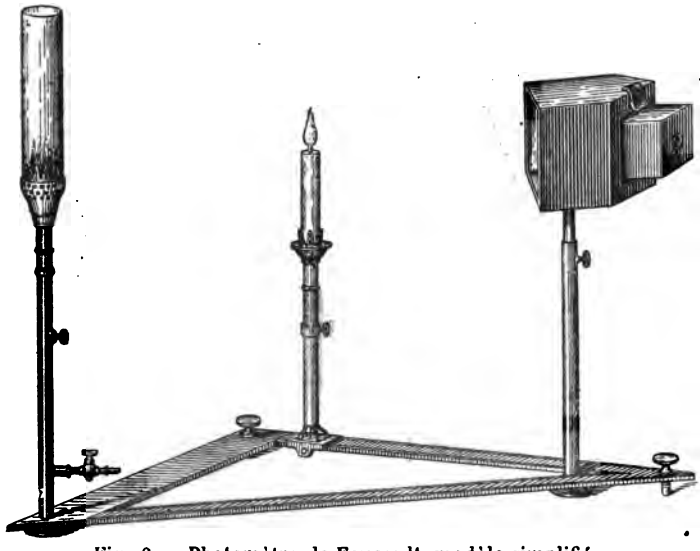


Fig. 8. — Photomètre de Foucault, modèle simplifié.

à l'égalité des éclairements produits par les deux luminaires, il faut que ces trois coefficients aient respectivement les mêmes valeurs pour les deux plages de l'écran, c'est-à-dire que l'écran soit parfaitement homogène.

Si cette condition n'est pas exactement remplie, on peut cependant

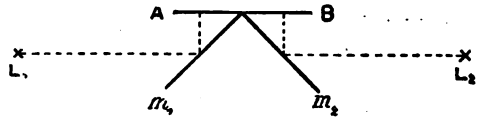


Fig. 9. — Dispositif de Ritchie.

éliminer l'erreur qui en résulte, en répétant la mesure, après avoir retourné l'écran de manière que la plage de gauche devienne la plage de droite et réciproquement.

21. *Construction de l'écran de Foucault.* — La nature de l'écran opalescent du photomètre de Foucault étant d'une importance capitale pour l'exactitude des mesures, voici quelques détails sur sa construction,

empruntés en grande partie à un mémoire de M. Crova (1) sur les écrans diffusants. Les renseignements que nous donnons ici peuvent s'appliquer aussi à la construction des écrans diffuseurs, dont l'emploi joue un rôle assez important dans certains appareils photométriques, et sur lesquels nous aurons à revenir plus tard.

L'écran doit être assez transparent, mais pas suffisamment pour qu'on puisse distinguer le foyer lumineux au travers ; il faut que sa surface soit aussi uniforme que possible. Foucault employait un écran formé par une glace sur laquelle on avait laissé se déposer, très uniformément, une légère couche d'amidon ou de lait desséché ; la couche étant sèche, on la protège par une autre glace fixée par ses bords sur la première, en évitant tout contact avec elle; on arrive à ce résultat en collant

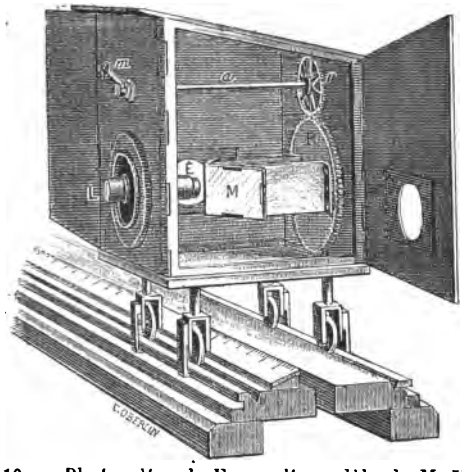


Fig. 10. — Photomètre de Foucault, modèle de M. Violle.

préalablement sur la deuxième glace un encadrement formé de minces bandes de papier.

Voici la manière dont M. Deleuil prépare les écrans de Foucault. On délaye de l'amidon de blé dans de l'eau distillée, on passe le liquide à travers un tissu très fin, et après avoir laissé déposer un instant, on décante le liquide laiteux qui est ensuite vivement agité et versé à l'aide d'une pipette sur une glace disposée bien horizontalement; la glace doit avoir été préalablement nettoyée avec le soin le plus méticuleux.

Quand le liquide laiteux s'est bien étendu jusqu'aux bords, on le laisse reposer, puis on donne à la glace une légère inclinaison au moyen d'une des vis du trépied sur lequel elle repose, et l'on produit l'écoulement de l'eau au moyen d'une bandelette de papier à filtrer fonctionnant comme

(1) *Ann. de chim. et de phys.* (6), vol. VI, p. 342.

siphon; on laisse enfin sécher sur place. Le liquide laiteux doit être employé immédiatement et la température ne doit pas dépasser 18°; l'expérience indique quel est le degré d'opacité à donner au liquide.

Quant à l'opacité de la couche, il suffit de lui donner l'épaisseur nécessaire pour qu'en regardant le soleil à travers l'écran on ne puisse en distinguer ni les bords ni même la position.

Dans certains cas, l'écran construit de cette manière est un peu trop opaque; M. Crova a réussi à en obtenir de plus translucides et d'une homogénéité remarquable en employant de la fécule de betterave, dont les grains sont sphériques, d'une grande limpidité et très petits.

Pour obtenir cette fécule, on met tremper la graine plusieurs jours dans de l'eau souvent renouvelée, puis on coupe chaque graine en deux, au moyen d'un scalpel très fin; avec une aiguille coupante, et en se servant de la loupe, on détache les petits paquets de fécule contenus dans le grain, qui apparaissent sous la forme de petits points blancs.

Cette fécule est broyée avec de l'eau dans un mortier en verre et le liquide laiteux passé à travers une mousseline très fine. Cette préparation est très longue, mais elle donne des écrans d'une finesse et d'une uniformité de grains remarquables.

On peut aussi se servir de glaces dépolies, mais il est très difficile d'être maître du degré d'opacité de la surface dépolie, et de lui donner l'uniformité nécessaire. Cette surface est aussi extrêmement altérable et d'une instabilité remarquable; le moindre frottement, un contact même léger avec une surface organique, suffisent pour produire un changement local d'opacité auquel il est impossible de remédier; aussi, lorsqu'on a un verre dépoli satisfaisant aux conditions voulues, faut-il, comme pour l'écran Foucault, le protéger d'une manière définitive par une glace transparente fixée sur ses bords, sans le toucher. On a réussi à obtenir des verres opales très homogènes, d'un aspect laiteux, sans grain appréciable, que l'on dresse comme des faces à glaces parallèles; mais ces écrans modifient, par un phénomène de diffraction, la teinte de la lumière incidente, et celle qu'ils diffusent paraît un peu rougeâtre.

Cette altération de la teinte par les glaces opales n'offre aucun inconvénient si l'écran est employé simplement à constater l'égalité des éclairements; mais elle devient un obstacle lorsque l'écran sert à affaiblir la lumière.

Photomètres à relief.

22. Dans les photomètres précédents, les deux plages de l'écran sont placées dans le même plan.

Pour que les deux sources de lumière que l'on compare puissent être placées dans l'axe du même banc photométrique, des deux côtés de

l'écran, il faut avoir recours au système de miroirs imaginé par Ritchie.

On peut cependant obtenir le même résultat de la manière suivante, proposée d'abord par M. Villarceau et reprise ensuite avec une légère modification par MM. Sylvanus Thompson et Starling.

Dans le photomètre à relief de M. Villarceau, l'écran est formé par deux plaques p_1 et p_2 opaques, placées verticalement sur le banc d'optique et faisant entre elles un angle droit (fig. 11). La plaque p est éclairée uniquement par les rayons lumineux provenant de L_1, tandis que la plaque p_2 ne reçoit que les rayons de L_2. L'égalité des éclairements des deux faces de l'écran peut être constatée avec la plus grande facilité, car l'écran entier apparaît alors comme une seule surface plane, éclairée, dans laquelle l'arête du dièdre de l'écran n'est plus perceptible. Les intensités lumineuses des deux foyers sont alors dans le rapport inverse des carrés de leurs distances à l'arête de l'écran.

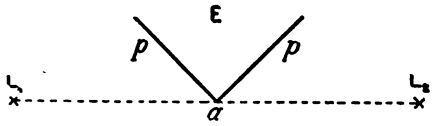


Fig. 11. — Photomètre à relief.

M. Conroy (1) a modifié la disposition des écrans du photomètre à relief de M. Villarceau afin d'augmenter la précision des mesures en supprimant la difficulté qu'il y a de faire disparaître l'arête des deux plages. Voici la disposition imaginée par M. Conroy. La figure 12 en donne les détails.

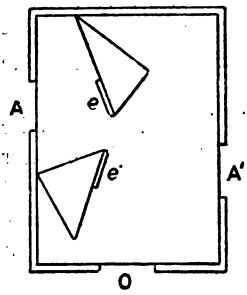


Fig. 12. — Écran de Conroy.

La boîte renfermant les deux écrans est placée sur le banc photométrique de manière que la lumière provenant des foyers que l'on compare pénètre par les ouvertures circulaires A et A'. Les écrans e et e' sont fixés aux extrémités des faces hypothénuses des deux triangles T et T'; ils sont découpés simplement dans une feuille de papier blanc et peu collé. L'observateur regarde par l'ouverture O et fixe le moment où les deux écrans e et e' étant également éclairés apparaissent comme une seule plage. M. Conroy a trouvé qu'il était avantageux pour les mesures d'observer les écrans sous une incidence de 60 degrés environ, ceux-ci étant éclairés sous une incidence de 30 degrés; ces conditions sont réalisées sur la figure.

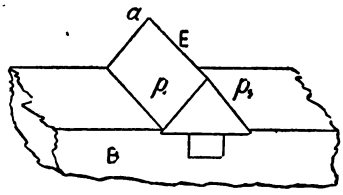


Fig. 13. — Écran Thompson et Starling.

(1) *Phil. Mag.*, 1883, vol. I, p. 425.

23. Dans l'appareil de MM. Thompson et Starling (fig. 13) l'écran cunéiforme est disposé de manière que l'arête *a* soit horizontale ; cette disposition exige que l'observateur vérifie l'égalité des éclairements en se plaçant au-dessus de l'écran, c'est-à-dire entre les deux foyers. Si l'on veut s'affranchir de cette condition, il faut avoir recours à un miroir incliné de 45 degrés sur l'horizontale et renvoyant en avant l'image de l'écran.

Photomètre de Bunsen.

24. De tous les photomètres industriels, celui de Bunsen est certainement l'un de ceux dont l'emploi est le plus fréquent, en Allemagne surtout.

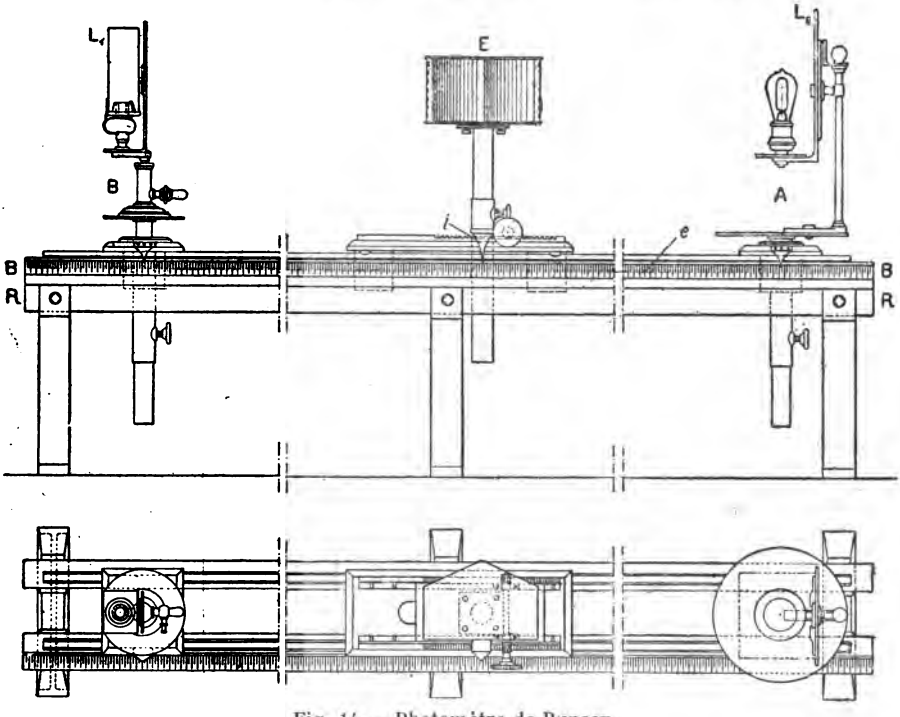


Fig. 14. — Photomètre de Bunsen.

Cela tient à ce que sa manipulation est assez rapide et ses indications relativement très précises.

Le photomètre de Bunsen est basé sur la propriété suivante : une tache d'huile ou de graisse sur une feuille de papier paraît brillante sur un fond sombre lorsqu'on la regarde par transparence et sombre sur un fond éclairé lorsqu'on la regarde par réflexion. Par conséquent, si le papier est éclairé également des deux côtés, la tache ne doit être ni

brillante sur un fond sombre, ni sombre sur un fond éclairé, elle disparaît donc complètement.

La construction du photomètre de Bunsen est très bien comprise (fig. 14). L'écran E et ses accessoires sont montés sur un chariot mobile sur un banc divisé (banc d'optique), sur lequel sont placées en A et B les deux sources lumineuses L_1 et L_2 dont on veut comparer les intensités. L'écran est disposé de telle sorte que les rayons provenant des deux luminaires sont perpendiculaires à cet écran.

25. Afin de pouvoir observer simultanément les deux côtés de l'écran, on emploie très souvent un système de miroirs proposé par Rudorff (1) (fig. 15).

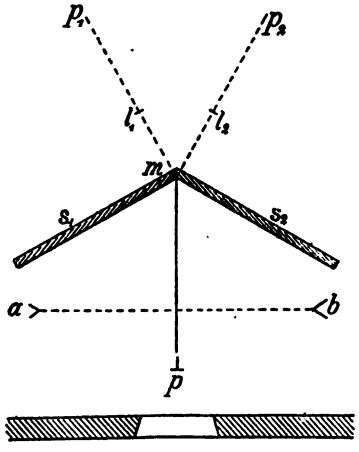


Fig. 15. — Miroir de Rudorff.

Dans ce dispositif, l'écran pt constitue le plan bissecteur des deux miroirs S_1 et S_2 qui forment entre eux un angle de 140 degrés. L'écran est éclairé par les rayons a et b venant des deux foyers lumineux que l'on compare. L'observateur place l'œil en o et voit, à travers l'ouverture ménagée dans la paroi du photomètre, les deux faces de l'écran réfléchies en $p_1\ t_1$ et $p_2\ t_2$ par les miroirs S_1 et S_2.

Le plus grave défaut de ce dispositif provient de ce que les deux images de la tache $t_1\ p_1$ et $t_2\ p_2$ sont très éloignées l'une de l'autre et séparées par les ombres mt_1 et mt_2; il est impossible d'éviter cet inconvénient puisqu'il est nécessaire que la tache soit à une distance assez grande de l'arête du miroir pour qu'elle soit toujours en dehors de la zone obscure mt.

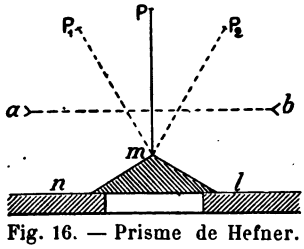


Fig. 16. — Prisme de Hefner.

M. von Hefner Alteneck (2) a modifié la disposition de Rudorff et l'a remplacée par celle de la figure 16 dans laquelle les miroirs sont supprimés et remplacés par un prisme nml placé en avant de l'écran mp_1 et mp; elles sont contiguës et aucune zone d'ombre n'entrave les observations.

M. Krüss (3) a modifié cet arrangement de manière à éviter la déformation des images produite par les réflexions et les réfractions dans le prisme.

(1) *Journal für Gasbeleuchtung*, 1869, p. 567.
(2) *Elektr. Zeitschr.* 1883. *Lum. él.*, vol. X, p. 500.
(3) *Centralbatt f. Elektr.* vol. VI, p. 781.

La figure 17 donne le détail de la modification imaginée par M. Krüss. L'écran P est placé dans le plan médian des deux prismes I et II. L'angle formé par les faces des prismes est choisi de manière que les rayons qui tombent perpendiculairement sur la face A_1 du prisme I et qui proviennent des points *ab* de l'écran soient réfléchis en B_1 C_1 et A_1 et sortent du prisme perpendiculairement à la face D_1. Les rayons suivent une trajectoire analogue dans le prisme II. Un tube, d'une longueur variable suivant la vue de l'observateur, peut être placé en avant des faces D_1 et D_2 ; ce tube est terminé par un diaphragme à petite ouverture qui fixe la position de l'œil dans le plan de l'écran.

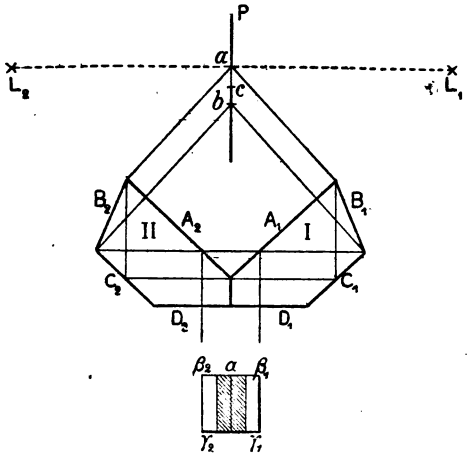


Fig. 17. — Prisme de Krüss.

L'œil voit alors le champ visuel partagé en deux moitiés par la ligne de séparation *a* des deux faces D_1 et D_2 ; à droite se trouve l'image du côté droit de l'écran éclairé par l'une des sources lumineuses L_1. L'image du côté gauche de l'écran éclairé par l'autre source lumineuse L_2 se trouve à gauche. L'image de *a* tombe ainsi dans la zone α et celle de *b* dans les parties latérales du champ visuel β_1 et β_2.

Si la partie *ac* de l'écran représente la tache, γ_1 et γ_2 représentent les images des bords de la tache, et les comparaisons sont exactes.

On peut transformer immédiatement l'écran de Bunsen en écran de Foucault en supprimant la tache ou en la déplaçant hors du champ visuel.

La nature du papier qui constitue l'écran et celle de la tache ont une influence considérable sur la précision des mesures. Pour s'en rendre compte d'une manière exacte, il faut faire une étude théorique complète de l'appareil.

Théorie de l'écran de Bunsen (1).

26. Considérons le cas le plus général dans lequel les deux faces de l'écran ne sont pas identiques, c'est-à-dire ont des coefficients de trans-

(1) *Léonard Weber*. Théorie du photomètre de Bunsen. *Ann. de Wied.*, vol. XXXI, p. 671. — *Lum. él.*, vol. XXXI, p. 267. *Boulouch*. Sur le photomètre de Bunsen. *Comptes rendus*, vol. CV.

parence et de réflexion différents. Nous pouvons ensuite simplifier les formules en admettant l'identité des deux faces.

Désignons par a_1 le coefficient d'absorption, par t_1 le coefficient de transparence, par r_1 le coefficient de réflexion de la partie opaque de la face gauche de l'écran, et par a'_1, t'_1 et r'_1 les mêmes coefficients relatifs à la face gauche de la tache. Désignons, en outre, par a_2, t_2, r_2, et a'_2, t'_2 et r'_2 les mêmes coefficients relatifs à la face droite de l'écran.

Le coefficient r_1, par exemple, détermine l'éclairement de la partie opaque de la face gauche de l'écran dû au luminaire de gauche L_1, tandis que t_1 détermine l'éclairement de la même partie de l'écran dû au luminaire de droite L_2; les autres coefficients déterminent de la même manière l'éclairement des autres parties de l'écran.

Ces coefficients varient avec la direction sous laquelle l'observateur regarde l'écran; en admettant que l'écran satisfait à la loi de Lambert, on doit avoir :

$$a + t + r = 1.$$

On peut pratiquement admettre que cette loi est satisfaite, à condition de toujours observer l'écran dans la même direction.

Appelons e_1 l'intensité d'éclairement du côté gauche de la partie opaque de l'écran, et e'_1 l'intensité d'éclairement du côté gauche de la tache; désignons par e_2 et e'_2 les quantités correspondantes relatives au côté droit de l'écran. Soient, en outre, I_1 et I_2 les intensités des luminaires de gauche et de droite, d_1 et d_2 leur distance à l'écran, on obtient immédiatement, en négligeant un facteur de proportionnalité qui, d'ailleurs, s'élimine dans le résultat final :

$$e_1 = \frac{I_1 r_1}{d_1^2} + \frac{I_2 t_1}{d_2^2} \qquad e'_1 = \frac{I_1 r'_1}{d_1^2} + \frac{I_2 t'_1}{d_2^2}$$

$$e_2 = \frac{I_2 r_2}{d_2^2} + \frac{I_1 t_2}{d_1^2} \qquad e'_2 = \frac{I_2 r'_2}{d_2^2} + \frac{I_1 t'_2}{d_1^2}.$$

On a donc, sur chaque face de l'écran, deux intensités d'éclairement, savoir : e_1 et e'_1 sur la face gauche, et e_2 et e'_2 sur la face droite.

On peut donc faire les observations de trois manières différentes, savoir :

1° Les deux éclairements e_1 et e'_1 sont égaux, c'est-à-dire que la tache disparaît sur la face gauche de l'écran;

2° Les éclairements e_2 et e'_2 sont égaux, ce qui correspond à la disparition de la tache sur la face droite de l'écran;

3° Les rapports $\frac{e'_1}{e_1}$ et $\frac{e'_2}{e_2}$ sont égaux, c'est-à-dire que la tache ressort, avec la même intensité, du reste de la feuille de papier, des deux côtés de l'écran.

Supposons les deux luminaires fixes et l'écran mobile; appelons G la

position de l'écran correspondant au premier mode d'observation, D la position relativé au deuxième mode, et M la position correspondant au troisième procédé de mesure.

Le point M est généralement situé entre G et D. Quant à la position relative de G et de D, on distingue deux cas suivant la nature de l'écran.

Dans le premier cas, le point G est situé à droite de M, et le point D à gauche; ces trois points se succèdent donc dans l'ordre suivant : D, M, G, en allant de gauche à droite ; l'écran est appelé alors *écran négatif*; on l'appelle *écran positif* si les trois points se succèdent dans l'ordre inverse.

Le signe d'un écran dépend des coefficients de transparence et de réflexion de la tache et du papier opaque adjacent.

Avec un écran positif, le cas peut se présenter où les trois points GMD coïncident. La tache paraît claire sur un fond sombre dans la position M; elle est sombre sur un fond clair avec un écran négatif.

Ces deux caractères distinctifs ne sont valables que lorsque la tache est plus transparente que le reste de l'écran; ils doivent être intervertis lorsque la tache est moins transparente, ce qui a lieu, par exemple, lorsque la tache est formée par un vernis opaque.

Si l'on règle l'écran de manière à faire disparaître la tache sur la face gauche de l'écran (pointé G), on a $e_1 = e'_1$, c'est-à-dire :

$$\frac{I_1 r_1}{d_1^2} + \frac{I_2 t_1}{d_2^2} = \frac{I_1 r'_1}{d_1^2} + \frac{I_2 t'_1}{d_2^2},$$

d'où

$$I_1 = \frac{(t'_1 - t_1) d_1^2}{(r_1 - r'_1) d_2^2} I_2.$$

Désignons le rapport $\frac{d_1^2}{d_2^2}$ par la lettre p, nous aurons :

$$I_1 = \frac{t'_1 - t_1}{r_1 - r'_1} p_1 I_2. \qquad (1)$$

L'observation de la disparition de la tache sur le côté droit donne, de la même manière (pointé D) :

$$I_1 = \frac{r_2 - r'_2}{t'_2 - t_2} p_2 I_2.$$

Si l'on admet que des coefficients r et t sont égaux entre eux, c'est-à-dire :

$$r_1 = r_2 \qquad t_1 = t_2 \qquad r'_1 = r'_2 \qquad t'_1 = t'_2,$$

on obtient, en faisant le produit des deux relations précédentes :

$$I_1 = \sqrt{p_1 p_2} I_2. \qquad (3)$$

Cette formule suppose que les deux faces de l'écran sont identiques; on peut s'affranchir de cette restriction en faisant deux nouveaux pointés, p_3 et p_4, après avoir retourné l'écran. On a alors :

$$I = \sqrt[4]{p_1 p_2 p_3 p_4} I_2. \qquad (4)$$

On obtient un résultat analogue en employant la troisième méthode, dans laquelle les observations se font dans la position M : on pointe alors de manière à obtenir des contrastes égaux dans les éclairements, c'est-à-dire on fait :

$$\frac{e'_1}{e_1} = \frac{e'_2}{e_2}.$$

On considère le rapport des éclairements et non celui de leur différence, puisque, d'après la loi psycho-psychique de E.-H. Weber (§ 8), la perception des différences de deux sensations est proportionnelle à leur rapport et non à leur différence.

Or, on a :

$$\frac{e'_1}{e_1} = \frac{I_1 r'_1 + I_2 t'_1 p_1}{I_1 r_1 + I_2 t_1 p_1}$$
$$\frac{e'_2}{e_2} = \frac{I_2 r'_2 p_1 + I_1 t'_2}{I_2 r_2 p_1 + I_1 t_2}.$$

La condition

$$\frac{e'_1}{e_1} = \frac{e'_2}{e_2}$$

donne alors pour I_1 l'équation quadratique :

$$k_1 I_1^2 + p_1(k_3 - k_4) I_2 I_1 + k_2 p_1^2 I_2^2 = 0$$

dans laquelle

$$k_1 = r'_1 t_2 - r_1 t'_2 \qquad k_2 = r_2 t'_1 - r'_2 t_1$$
$$k_3 = t_2 t'_1 + r_2 r'_1 \qquad k_4 = t_1 t'_2 + r_1 r'_2.$$

En admettant l'identité des deux côtés de l'écran, on a $k_3 = k_4$ et $k_1 = k_2$; on obtient alors la formule ordinaire

$$I_1 = p_1 I_2. \tag{5}$$

Dans le cas général, on peut éliminer les coefficients r et t, en effectuant un second pointé p_2 en M, après avoir retourné l'écran. Les facteurs k_1 et k_2, k_3 et k_4 sont intervertis et l'on obtient :

$$I_1 = \sqrt{p_1 p_2}\, I_2. \tag{6}$$

27. Pour compléter cette courte théorie du photomètre de Bunsen, il faut établir encore les formules qui permettent de calculer l'erreur des mesures.

L'erreur ΔI_1 du résultat dépend de l'erreur Δp du pointé p ; les considérations suivantes donnent l'expression algébrique de cette dépendance.

Dans le cas où l'on se borne à une seule mesure (formule 2), on a :

$$\frac{\Delta I_1}{I_1} = \frac{\Delta p_1}{p_1}. \tag{2'}$$

Dans le cas où l'on fait deux pointés p_1 et p_2, on peut admettre que les

erreurs Δp_1 et Δp_2 des deux pointés sont égales. On a alors (formule 3 ou 6) :

$$\frac{\Delta I_1}{I_1} = \frac{1}{2}\sqrt{2}\frac{\Delta p}{p}. \qquad (3' \text{ et } 6')$$

Enfin, si l'on fait quatre pointés, on a :

$$\frac{\Delta I_1}{I_1} = \frac{1}{4}\sqrt{4}\frac{\Delta p}{p}. \qquad (4')$$

Il faut donc évaluer avant tout le rapport $\frac{\Delta p}{p}$.

Ce rapport dépend de deux facteurs qui varient suivant la nature de l'observation (G, D, M). Le premier est une fonction des coefficients r et t, c'est-à-dire de la nature de l'écran ; le second facteur dépend des qualités psycho-physiologiques de l'œil, et en particulier de la faculté plus ou moins grande de l'œil de percevoir l'égalité d'éclairement de deux surfaces (en D ou en G), ou de percevoir l'égalité des contrastes de deux éclairements.

Désignons par

$$\Delta q_1 = \frac{\Delta e'_1}{\Delta e_1}$$

$$\Delta q_2 = \frac{\Delta e'_2}{\Delta e_2}$$

$$\Delta Q = \frac{\Delta\left(\frac{e'_1}{e_1}\right)}{\Delta\left(\frac{e'_2}{e_2}\right)}$$

les rapports des éclairements ou de contrastes encore perceptibles à l'œil à la limite; on trouve, après plusieurs réductions, les valeurs suivantes pour le rapport $\frac{\Delta p}{p}$, dans les trois positions principales de l'écran :

$$\frac{\Delta p}{p} = f_1 \Delta q_1 \qquad \text{(en G)}$$

$$\frac{\Delta p}{p} = f_2 \Delta q_2 \qquad \text{(en D)}$$

$$\frac{\Delta p}{p} = F.\Delta Q \qquad \text{(en M)}$$

Les constantes f_1, f_2, F ont les valeurs suivantes :

$$f_1 = \frac{r_1}{r_1 - r'_1} + \frac{t_1}{t'_1 - t_1}$$

$$f_2 = -\left[\frac{r_2}{r_2 - r'_2} + \frac{t_2}{t'_2 - t_2}\right]$$

$$F = \frac{1}{\frac{r_1 - t_1}{r_1 + t_1} + \frac{t'_1 - r'_1}{t'_1 + r'_1}}.$$

Pour simplifier, on a supposé, dans le calcul de F seulement, que les deux côtés de l'écran sont identiques.

Les facteurs f_1, f_2 et F sont les *coefficients de sensibilité* de l'écran pour les positions G, D et M. La valeur minimum de f_1 ou de f_2 est égale à 1, tandis que celle de F est égale à 0,5. Cependant, ces coefficients ont des valeurs plus élevées dans la réalité.

Construction de l'écran de Bunsen.

28. Dans la construction de l'écran de Bunsen, il faut rendre les coefficients de sensibilité f_1, f_2 et F aussi faibles que possible. Pour cela, il faut que les coefficients r_1' et t_1 soient très petits, r_1 et t_1' étant très grands. Le meilleur écran est donc formé par un disque blanc, mat et opaque, tandis que la tache est aussi transparente que possible, et affectée d'un coefficient de réflexion insensible.

L'erreur des mesures dépend aussi des valeurs sensibles de la perception, Δq_1, Δq_2 et ΔQ. Or, ces valeurs sensibles sont d'autant plus faibles que les déliminations de la tache et de la partie opaque de l'écran sont plus parfaites. On peut avoir, avec certains écrans, des valeurs favorables pour les coefficients de sensibilité f et F, mais des valeurs défavorables pour les valeurs sensibles Δq et ΔQ.

A cet égard, les nombres suivants obtenus par M. Léonard Weber de Breslau, sur huit écrans différents, permettent de se faire une idée exacte de l'ordre de grandeur de ces coefficients. Ces huit écrans, désignés par les chiffres 1 à 8, ont des constantes assez différentes, ce qui est, d'ailleurs, une conséquence des différences de leur construction dont la description suivante permet de se rendre compte :

N° 1. — Écran d'après Tœpler : une feuille de papier blanc percée d'un trou circulaire, recouverte, de chaque côté, d'une feuille de papier à décalquer, réunies sans colle.

N° 2. — Deux cartons blancs, minces, percés d'un trou circulaire; entre les deux se trouve une feuille de papier à décalquer.

N°s 3 et 4. — Écrans de Kruss : feuilles de papier écolier blanc, avec une tache de paraffine.

N° 5. — Carton blanc percé d'un trou, recouvert d'une feuille de papier à décalquer noircie à la mine de plomb, pour avoir des faces inégales.

N° 6. — Deux feuilles de papier blanc identiques, percées d'un trou et recouvertes, de chaque côté, d'une feuille de papier à décalquer.

N° 7. — Deux feuilles de papier blanc, entre lesquelles se trouve une feuille de papier à décalquer.

N° 8. — Papier huilé, tache formée, de chaque côté, par une bande de vernis blanc.

Le tableau ci-dessous renferme les valeurs obtenues pour les rapports des coefficients r et t de la face gauche de l'écran; sauf pour le numéro 5, les différences entre les deux faces sont insensibles. La sixième colonne

renferme la moyenne des valeurs de f_1 et f_2, peu différentes d'ailleurs; la septième la moyenne des valeurs correspondantes Δq_1 et Δq_2, savoir :

$$\Delta q = \frac{\Delta q_1 + \Delta q_2}{2}.$$

Les deux dernières colonnes renferment les valeurs de F et de ΔQ.

NUMÉRO de L'ÉCRAN.	$\frac{r_1}{r'_1}$	$\frac{t'_1}{t_1}$	$\frac{r_1}{t_1}$	$\frac{t'_1}{r'_1}$	f	Δq	F	ΔQ
1	1.71	3.48	4.81	1.24	2.98	0.89 0.96	1.34	1.49 1.49
2	4.54	0.25	»	2.33	1.30	1.88 2.10	0.71	2.26 1.56
3	1.94	1.71	2.74	1.21	3.41	1.11 0.76	1.77	0.79 0.90
4	1.93	3.51	6.18	1.10	2.55	1.18 1.24	1.32	1.97 1.52
5	3.23	9 83	26.34	1.21	»	» »	»	» »
6	1.75	10.76	12.38	1.52	2.53	0.86 0.71	0.95	0.84 2.53
7	3.76	6.47	13.26	1.83	1.58	1.42 1.67	0.87	1.16 0.93
8	1.38	2.66	4.94	0.84	4.06	0.47 0 36	1.92	0.73 0.99

Les valeurs de Δq et de ΔQ, renfermées dans la première ligne horizontale, sont relatives à l'organe visuel de M. Weber; celle de la deuxième à celui de son assistant. Connaissant f, Δq et F, ΔQ, il est facile de calculer l'erreur de pointé dans les positions G,D ou M de l'écran; on voit alors que l'exactitude atteinte avec les divers écrans est toujours plus faible que l'exactitude limite qui résulte des conditions de sensibilité de l'œil; elle varie, en outre, avec l'observateur.

Ainsi donc le meilleur écran est, non pas celui pour lequel les coefficients de sensibilité ou les coefficients Δ ont une valeur minimum, mais celui pour lequel le produit f, Δq est un minimum.

Voici un procédé très simple pour construire un écran dont les propriétés sont très satisfaisantes : on tend, sur une planche, une feuille de papier blanc; un disque de laiton, de 20 millimètres de diamètre et muni d'une tige, est chauffé, puis plongé dans un bain de paraffine; après l'avoir égoutté un peu, on le place soigneusement sur la feuille de papier; on fait ainsi successivement un certain nombre de taches, et on choisit la meilleure; on enlève enfin la paraffine en surplus, à l'aide d'une feuille de papier buvard, sur laquelle on déplace un fer chauffé modérément, de manière à ne pas déformer les bords de la tache.

Afin de faciliter le retournement, on place l'écran dans un cadre mobile, dans un châssis; ce châssis doit être muni de ressorts lamellaires qui maintiennent la feuille parfaitement rigide.

Le retournement de l'écran s'impose, en quelque sorte, dans toutes les mesures de précision, car la nature des deux faces de l'écran peut varier très rapidement.

Aussi, il ne suffit pas d'avoir constaté, à un moment donné, l'identité des deux faces de l'écran, pour qu'on soit autorisé à utiliser ce résultat dans des mesures ultérieures, les conditions physiques des deux faces de l'écran pouvant avoir varié.

Si, par exemple, l'une des faces de l'écran a été exposée plus que l'autre à la lumière diffuse, on constate immédiatement des différences très sensibles dans la valeur des coefficients a, t et r. Il faut donc conserver les écrans dans l'obscurité, dans l'intervalle des mesures.

La liste que nous avons donnée plus haut indique d'autres modes de construction de l'écran; les avantages des uns et des autres ne sont pas tels qu'on puisse indiquer l'un comme préférable aux autres.

Écrans d'Elster et de Joly.

29. Il faut ajouter aux écrans mentionnés plus haut l'écran tout particulier, imaginé par M. Elster (1), de Breslau. Cet écran est constitué (fig. 18) par deux parallélipipèdes séparés par une lame de métal opaque; le tout est comprimé de manière à ne former qu'un seul bloc. La substance translucide doit être choisie de manière à diffuser la lumière également dans tous les sens.

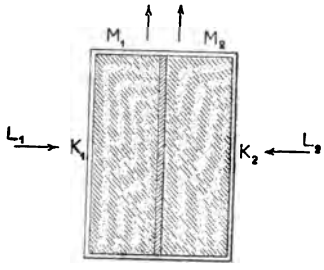


Fig. 18.

Les rayons lumineux provenant des sources L_1 et L_2 que l'on compare, tombent normalement sur les faces K_1 et K_2 de l'écran; l'observateur constate l'égalité d'éclairement des deux moitiés d'une des faces verticales M_1, M_2, parallèles aux rayons lumineux. Les éclairements des faces K_1 et K_2 le sont aussi. On peut employer la stéarine ou la paraffine pour former le bloc translucide; cependant, des verres opaques peuvent également être utilisés avec avantage.

30. L'écran imaginé à peu près à la même époque par M. Joly (2), de Dublin, est analogue à celui d'Elster; il repose sur le principe suivant.

Quand un corps translucide est fendu, la lumière qui le traverse est réfléchie en partie par les faces de la fente, de sorte que la partie du corps, au delà de celle-ci, paraît plus sombre que celle qui en est en deçà. Si cette fente est tournée de manière que la lumière tombe également sur

(1) *Lum. él.*, vol, II, p. 540.
(2) *Lum. él.*, XXIX, p. 238.

les deux faces, ou bien si deux sources lumineuses éclairent également les deux faces, la fente intérieure n'est plus visible.

M. Joly a employé deux parallélipipèdes en paraffine, accolés suivant une de leurs faces; on place alors l'écran de manière que la fente soit verticale, c'est-à-dire perpendiculaire aux rayons lumineux des deux foyers.

Au lieu de paraffine, M. Joly a également employé des verres opales, qui ont l'avantage de durer plus longtemps, et de permettre un ajustage plus exact. Les deux parallélipipèdes sont, dans ce cas, collés avec du baume du Canada; si l'on intercale, en outre, une feuille d'argent, on obtient un écran Elster. On ajuste avec soin la face du bloc normale à la fente, l'observateur, visant cette face, constate la disparition de la fente au moment où les deux moitiés de l'écran sont également éclairées. Les parallélipipèdes qui ont donné les meilleurs résultats avaient des arêtes de 20, 50 et 11 millimètres.

On compense, dans ces deux écrans, les différences de transparence des deux moitiés du bloc translucide en retournant l'écran; la moyenne des valeurs obtenues dans les deux cas est corrigée de cette cause d'erreur.

Écran optique de Lummer et Brodhun.

31. Dans cet écran, fort bien étudié, l'inconvénient résultant de la transparence de la tache et du papier est complètement supprimé, en sorte que chacun des deux champs dont on compare les éclairements ne reçoit de lumière que d'une seule source; en outre, la ligne de séparation des deux champs est très précise, et elle disparaît complètement au moment de l'égalité d'éclairement.

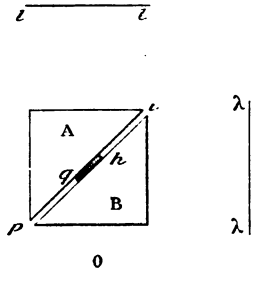


Fig. 19.

L'écran de Lummer et Brodhun (1) est basé sur le dispositif suivant.

Soient l et λ deux surfaces éclairées (fig. 19) et émettant de la lumière diffuse; A et B, deux prismes à angle droit, réunis par leur face hypoténuse, de telle sorte que la lumière réfléchie sur la partie hi de cette face et venant de λ soit renvoyée en o, tandis que la partie de la lumière venant de l et tombant sur la partie qh est transmise directement en o. L'œil placé en o, étant accommodé sur la face pi, perçoit une surface uniformément éclairée, lorsque les éclairements des surfaces l et λ sont dans un rapport déterminé.

Ces conditions peuvent être réalisées à l'aide de plusieurs dispositions différentes des prismes, parmi lesquelles la suivante a donné les meilleurs résultats.

(1) *Zeitschr. für Instrumentenkunde.* 1889, p. 41. — *Lum. él.*, vol. XXXIII, p. 410.

La face hypoténuse du prisme A a la forme d'une surface sphérique, coupée suivant un petit cercle par un plan que l'on appuie sur la face hypoténuse du prisme B. Les rayons qui proviennent de *l* traversent cette surface de contact sans aucune réflexion ou réfraction, et on obtient un champ elliptique dans la face hypoténuse uniformément éclairée du prisme B. Ce champ elliptique est très nettement délimité et la ligne de démarcation disparaît complètement au moment de l'égalité.

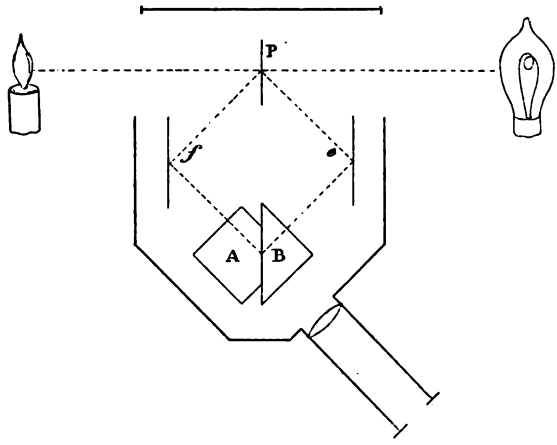


Fig. 20.

L'écran opaque *p* (fig. 20 et 20 *bis*) dont les deux faces correspondent aux surfaces *l* et λ de la figure pré-

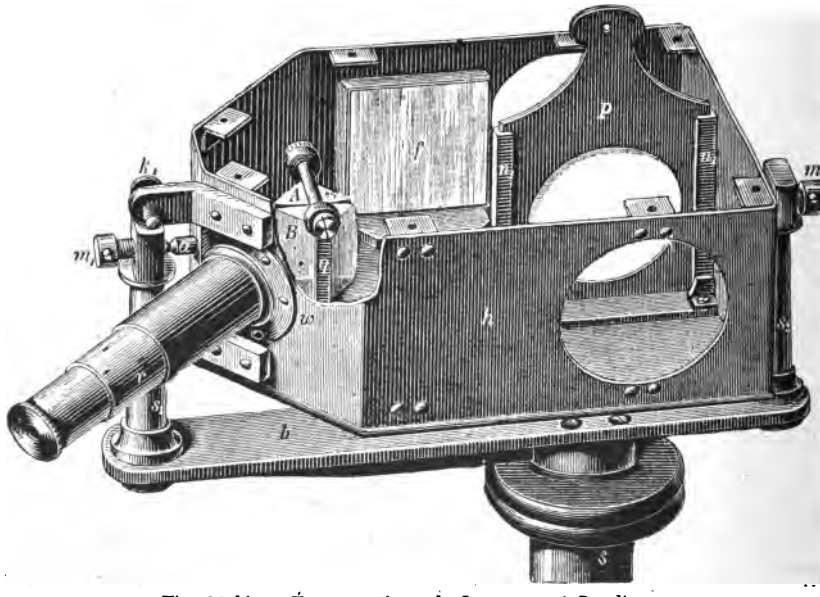


Fig. 20 *bis*. — Écran optique de Lummer et Brodhun.

cédente est disposé perpendiculairement au banc photométrique. La lu-

mière diffuse émise par les faces de l'écran tombe sur les miroirs *e* et *f* qui la réfléchissent normalement sur la face des prismes A et B; sur la figure on ne voit que le miroir *f*. L'observateur constate l'égalité d'éclairage des deux champs à l'aide de la lunette *r*. La cage photométrique est portée par l'axe horizontal *a* qui repose par ses extrémités sur les vis m_1 et m_2 fixées à l'extrémité des tiges verticales s_1 et s_2. L'écran est placé dans le cadre *n*, ce qui permet de le retourner à volonté. Les miroirs et les prismes sont munis de vis de réglage. La boîte du photomètre est pourvue en outre d'un couvercle muni d'une fente pour donner passage à l'écran sur les faces duquel la lumière des sources à comparer arrive au travers des ouvertures latérales circulaires.

Les tiges S_1 et S_2 sont munies de deux arrêts qui servent à fixer la position de la boîte photométrique après son retournement : cette dernière opération est nécessaire afin d'éliminer les erreurs de réglage et les différences des deux faces de l'écran formé par deux feuilles de papier séparées par une feuille de papier d'étain.

L'écran optique de Lummer et Brodhun a un coefficient de sensibilité égal à l'unité, tandis que celui des écrans Kruss ou Elster varie entre 2,5 et 3,5. Cet écran est donc beaucoup plus sensible que les écrans ordinaires et cette sensibilité est encore augmentée par le fait que la ligne de séparation des deux champs est nettement marquée, ce qui donne au coefficient Δq une valeur très faible. L'erreur moyenne d'un pointé a été trouvée égale à 0,5 0/0 environ.

Les pointés photométriques obtenus avec cet écran sont effectués en égalisant les éclairements des deux parties du champ. Ils sont donc analogues aux pointés G et D de l'écran de Bunsen. MM. Brodhun et Lummer ont modifié récemment (1) leur appareil de manière à pouvoir effectuer aussi le pointé M de l'écran de Bunsen, dans lequel on égalise les rapports ou contrastes d'éclairement des deux parties de chaque face de l'écran; le photomètre devient alors un photomètre à contraste.

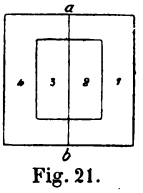


Fig. 21.

Ce résultat est obtenu de la manière suivante. La face hypoténuse des deux prismes en contact est divisée en quatre champs rectangulaires (fig. 21) 1, 2, 3, 4; la surface diverse est légèrement enlevée dans les champs 1 et 3 et laissée intacte dans les deux autres; les deux prismes sont ensuite pressés l'un contre l'autre et mis à la place du prisme primitif. On obtient alors dans les champs 1 et 3 de la lumière réfléchie provenant de droite et dans les champs 2 et 4 de la lumière transmise provenant de gauche. La ligne *ab* partage le champ visuel en deux moitiés dont chacune correspond à l'une des faces de l'écran de Bunsen et renferme une

(1) *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 1890, p. 461.

plage intérieure et une plage extérieure; la première correspond à la tache de l'écran de Bunsen et la seconde à la partie opaque. Mais, au moment du pointé, on aurait un éclairement uniforme et non des contrastes égaux; pour obtenir ce dernier résultat, on place des lames de verre de même épaisseur sur l'une des faces de l'angle droit de chaque prisme, de manière à affaiblir l'éclairement des parties 2 et 3 du champ. On peut modifier à volonté le contraste en variant l'épaisseur de ces plaques.

Les mesures précises de MM. Lummer et Brodhun ont montré que la sensibilité de l'appareil atteint sa valeur maximum pour un contraste

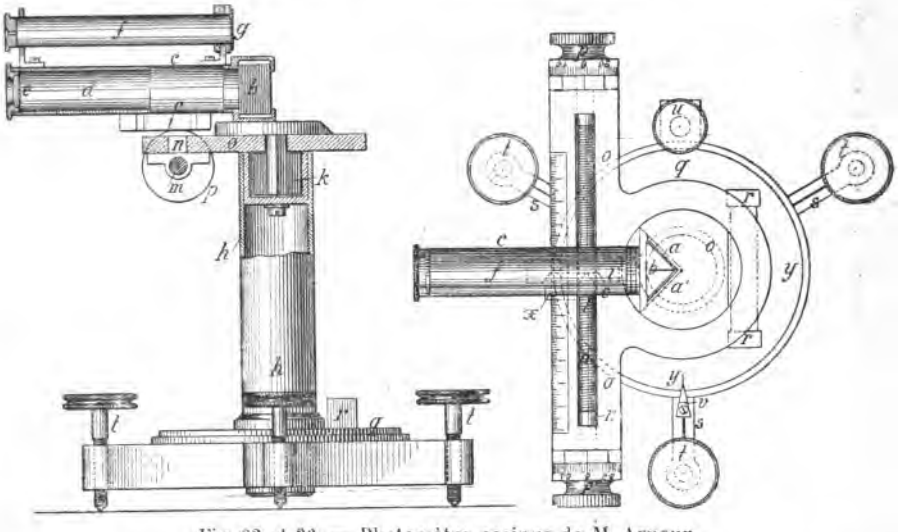


Fig. 22 et 23. — Photomètre cosinus de M. Arnoux.

de 4 p. 100 seulement. La précision est alors plus du double de celle qu'on obtient avec les éclairements égaux (pointés D ou G). L'erreur moyenne d'un pointé a été trouvée égale de 0,24 p. 100 pour un contraste de 3 p. 100 et de 0,81 p. 100 pour un contraste de 18 p. 100. Avec l'écran de Bunsen cette erreur oscille généralemement entre 1,5 et 4 p. 100.

De ce qui précède on peut donc tirer la conclusion que l'écran optique de Lummer et Brodhun est actuellement celui qui présente le plus d'avantages.

Photomètre Arnoux.

32. Le nombre des photomètres basés sur la seconde loi fondamentale de la photométrie est très restreint. L'appareil de M. R. Arnoux est à peu près le seul rentrant dans cette catégorie. De prime abord, on peut dire que les photomètres basés sur la loi du cosinus ne peuvent pas donner des résultats rigoureusement exacts, car cette loi n'est qu'approxi-

mative et n'est plus exacte du tout pour les incidences rasantes (1).

L'appareil de M. Arnoux se compose (fig. 22 et 23) de deux plaques *a* et *a'* en verre dépoli, faisant entre elles un angle arbitraire de 90°, par exemple. Une cloison très mince *b* en cuivre noirci, située dans le plan bissecteur, s'oppose à tout échange de lumière entre les deux plaques. Cet ensemble est fixé à l'extrémité d'un tube en cuivre *c* dans lequel glisse un second tube *d* muni d'une lentille *f* avec croisée de fils dont la ligne de mire se trouve dans le plan bissecteur des deux plaques et perpendiculaire à leur arête commune. L'appareil est supporté par un pied d'optique *h*; il peut aussi pivoter autour de la ligne d'intersection des deux plaques.

En dessous du tube *c* est fixée une bande de métal *i* dont une des faces verticales coïncide avec le plan bissecteur des deux plaques; cette face est constamment appliquée contre le biseau d'un écrou *l* sous l'influence d'un ressort spiral *k* placé dans le pied *h*. Cet écrou commandé par la vis micrométriqne *m* se déplace longitudinalement dans une rainure *n*. Le plateau supérieur *o* dans lequel cette rainure est fraisée est muni, sur l'un de ses bords parallèles à la rainure, d'une échelle divisée devant laquelle se meut le repère *x* gravé sur l'une des faces de l'écrou mobile *l*. Le zéro de cette graduation est disposé de manière à être dans le plan bissecteur des deux plaques, lorsque la rainure de l'axe de la vis micrométrique est perpendiculaire à ce plan.

On mesure ainsi la déviation de la lunette de sa position initiale par la tangente trigonométrique; le pas de la vis étant de 1 millimètre et le tambour étant divisé en 60 parties, on peut apprécier les déplacements de 0,1 millimètre.

Pour effectuer les mesures, on peut disposer les foyers de deux manières différentes.

Dans la première, les deux foyers L_1 et L_2 et l'arête des deux plages sont sur une même droite horizontale.

Soit β l'angle des rayons lumineux des deux foyers avec les normales aux deux plaques du photomètre, dans leur position initiale, et soit en outre α l'angle commun dont il faut les faire tourner pour obtenir l'égalité d'éclairement. Les éclairements des deux plages du photomètre seront égaux lorsque

$$\frac{I_2 \cos(\beta + \alpha)}{d_2^2} = \frac{I_1 \cos(\beta - \alpha)}{d_1^2}$$

I_1 et I_2 désignant les intensités de L_1 et de L_2, d_1 et d_2 leur distance à l'arête du photomètre.

On peut ainsi écrire cette relation :

$$\frac{{}^2}{I_1^2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \frac{1 + \tan\alpha \tan\beta}{1 - \tan\alpha \tan\beta}$$

(1) *Lum. él.*, vol. XXIII, p. 555.

Si l'angle des plages est de 90°, on a $\beta = 90°$, tang $\beta = 1$, et si r exprime en millimètres la distance de l'axe de la vis micrométrique à l'axe de rotation, et n le nombre de tours effectués par cette vis dont le pas est de 1 millimètre, on a :

$$\tang \alpha = \frac{n}{2},$$

d'où

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \cdot \frac{r+n}{r-n}.$$

Dans le deuxième procédé, on place les foyers L_1 et L_2 à angle droit, par rapport à l'arête du photomètre; mais cette disposition présente certains inconvénients.

Aussi n'insisterons-nous pas davantage sur cet appareil qui est très bien étudié, mais qui ne peut pas fournir des résultats suffisamment précis dans tous les cas.

B. — Photomètres basés sur l'emploi des diaphragmes et des lentilles divergentes.

33. Dans les photomètres de la première catégorie, l'égalité des éclairements des deux moitiés de l'écran est obtenue par les variations de la distance des luminaires à l'écran ou de l'inclinaison des rayons lumineux sur celui-ci.

Dans les photomètres de la deuxième catégorie, on obtient l'égalité des éclairements par des procédés divers qui affaiblissent l'intensité lumineuse dans un rapport bien déterminé. Parmi ces procédés, il faut surtout citer les méthodes de diaphragmation, celles de dispersion et celles qui sont fondées sur les phénomènes d'absorption. Avant d'aborder l'étude spéciale de ces méthodes, exposons d'abord très sommairement leur théorie.

Théorie et propriétés des diaphragmes.

34. Considérons l'éclairement produit sur la paroi d'une chambre noire par la lumière venue du dehors et traversant un trou pratiqué dans la paroi opposée ; si les rayons du faisceau lumineux sont parallèles, la paroi sera uniformément éclairée. Mais si l'on réduit le trou de moitié, la quantité de lumière reçue par le fond opposé sera également diminuée dans le même rapport; en général, la quantité de lumière reçue par la paroi qui sert d'écran sera directement proportionnelle à l'ouverture du trou.

Soit I_1 l'intensité d'un foyer lumineux placé normalement à la distance D_1 d'un diaphragme; l'intensité d'éclairement de ce dernier est alors $\frac{L_1}{D_1^2}$ et la quantité de lumière reçue par la surface S_1 du dia-

phragme est proportionnelle à S_1; elle est donc égale à $\frac{L_1S_1}{D_1^2}$. Cette surface agit à son tour comme une source lumineuse et à la distance d_1 du diaphragme; l'éclairement produit par la surface éclairante S_1 sur une surface S normale aux rayons lumineux est égal à $e_1 = \alpha_1 \frac{I_1S_1}{D_1^2 d_1^2}$; α_1 est un facteur de proportionnalité qui dépend des phénomènes de réflexion, de réfraction et de diffusion dont l'écran est le siège. On peut donc faire varier cette intensité d'éclairement en faisant varier la surface S_1 du diaphragme.

Le second foyer lumineux I_2 étant de même placé à la distance D_2 d'un second diaphragme S_2, l'intensité d'éclairement e_2 produite par ce dernier sur la surface S normale aux rayons lumineux provenant de L_2 et située à la distance d_2 du diaphragme est égale à

$$e_2 = \alpha_2 \frac{I_2S_2}{D_2^2 d_2^2}.$$

Les intensités d'éclairement des deux moitiés de la surface S seront égales, c'est-à-dire on aura $e_1 = e_2$ lorsque

$$\alpha_1 \frac{I_1S_1}{D_1^2 d_1^2} = \alpha_2 \frac{I_2S_2}{D_2^2 d_2^2}.$$

Si l'on connaissait les facteurs α_1 et α_2, on pourrait déterminer immédiatement le rapport de I_1 à I_2 en mesurant les surfaces S_1 et S_2 des deux diaphragmes au moment où l'égalité ci-dessus est satisfaite.

Au lieu de mesurer les coefficients α_1 et α_2 qui sont d'ailleurs peu constants, il est plus simple de les éliminer en combinant les mesures d'une manière spéciale. On arrive aisément à ce résultat en employant une source lumineuse auxiliaire L_0 sur la constance de laquelle on peut compter.

L'intensité de l'éclairement produit sur l'écran S par les rayons lumineux de L_0 est donnée par la relation

$$e_0 = \alpha_0 \frac{I_0S_0}{D_0^2 d_0^2} = k_0 I_0 S_0,$$

dans laquelle I_0 représente l'intensité lumineuse de L_0, S_0 l'aire du diaphragme, D_0 la distance de celui-ci à L_0 et d_0 la distance du diaphragme à l'écran.

En éclairant l'écran simultanément par les foyers L_0 et L_1, on parvient à égaliser les éclairements $e_0 = k_0 I_0 S_0$ et $e_1 = k_1 I_1 S_1$; on a alors :

$$k_0 I_0 S_0 = k_1 I_1 S_1. \qquad (1)$$

Les coefficients k_0 et k_1 ont les valeurs suivantes :

$$k_0 = \frac{\alpha_0}{D_0^2 d_0^2}$$

et

$$k_1 = \frac{\alpha_1}{D_1^2 d_1^2}.$$

On substitue ensuite le luminaire L_2 au foyer L_1 et on établit l'égalité des deux éclairements correspondants en faisant varier l'ouverture des diaphragmes,

$$e'_0 = k_0 I_0 S'_0 \quad \text{et} \quad e_2 = k_1 I_2 S_2$$

c'est-à-dire

$$k_0 I_0 S'_0 = k_1 I_2 S_2. \tag{2}$$

Les facteurs k sont restés les mêmes que dans l'expérience précédente, puisque la disposition des appareils n'a subi aucune modification.

En divisant ces deux relations membre à membre, on obtient :

$$\frac{S_0}{S'_0} = \frac{I_1 S_1}{I_2 S_2}$$

d'où

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_0 S_2}{S'_0 S_1}. \tag{3}$$

Dans la plupart des cas, on peut supprimer le diaphragme interposé sur le trajet des rayons lumineux de L_1 et de L_2 ; dans ce cas, la relation (3) devient simplement

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_0}{S'_0}.$$

Propriétés des lentilles de dispersion.

35. Supposons qu'une lentille bi-convexe soit placée à une distance p (fig. 24) de la source lumineuse L et qu'un écran soit en outre placé à une distance δ, la distance de l'écran à la source lumineuse est donc $p + \delta$. La divergence du faisceau lumineux provenant de L est augmentée après le passage à travers la lentille, de telle sorte que les rayons lumineux semblent provenir du foyer virtuel L', situé à la distance p' du centre optique de la lentille.

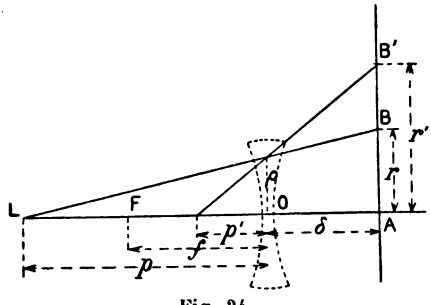


Fig. 24.

L'écran photométrique étant placé perpendiculairement à l'axe optique de la lentille, le faisceau lumineux réfracté éclaire alors un cercle de rayon $r' = AB'$, tandis que le faisceau primitif n'aurait été réparti que sur un cercle de rayon $AB = r$. En négligeant la correction exigée par ce fait que l'écran est plan et non sphérique, correction d'ailleurs négligeable si l'on observe dans le voisinage de l'axe, les intensités d'éclairement obtenues dans les deux cas sont inversement proportionnelles à r^2 et r'^2 ; or L et L' sont des foyers conjugués ; la distance focale

de la lentille est f; on a, en appliquant l'équation fondamentale des lentilles divergentes :

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}$$

$$p' = \frac{pf}{p+f}.$$

Le rayon de la lentille étant égal à ρ, on a :

$$\frac{r'}{\rho} = \frac{p'+\delta}{p'},$$

et

$$\frac{r}{\rho} = \frac{p+\delta}{p},$$

d'où

$$\frac{r'}{r} = \frac{p(p'+\delta)}{p'(p+\delta)}.$$

On obtient ensuite après quelques réductions :

$$\frac{r'}{r} = 1 + \frac{\delta p}{f(p+\delta)}.$$

Par conséquent les intensités des éclairements produits avec ou sans interposition de la lentille dans le trajet des rayons lumineux sont entre elles dans le rapport N :

$$N = \left(\frac{r'}{r}\right)^2 = \left(1 + \frac{\delta p}{f(p+\delta)}\right)^2.$$

Autrement dit, l'éclairage produit par la source lumineuse sur l'écran est le même que si la distance de celle-ci avait été augmentée dans le rapport $\frac{r'}{r}$; il faudra donc introduire dans les calculs, au lieu de la distance $d = p + \delta$, la distance d' donnée par la relation

$$d' = \frac{r'}{r}(p+\delta) = (p+\delta) + \frac{\delta p}{f}$$

ou

$$d' = d + \frac{\delta p}{f}.$$

On peut mettre aussi la formule ci-dessus sous une autre forme ; on a $p = d - \delta$, et, par conséquent :

$$d' = d + \frac{\delta(d-\delta)}{f}$$

$$d' = d\left(1 + \frac{\delta}{f}\right) - \frac{d^2}{f}.$$

Dans cette relation, la distance modifiée est exprimée en fonction de la distance réelle, de la constante f de la lentille et de la distance δ de la lentille à l'écran.

En posant :

$$a_1 = 1 + \frac{\delta}{f}$$

$$a_2 = \frac{\delta^2}{f}$$

on a

$$d' = a_1 d - a_2.$$

36. On peut alors calculer à l'avance les diverses valeurs de a_1 et de a_2 pour une lentille donnée, et pour diverses valeurs de δ.

L'action affaiblissante de la lentille est nulle lorsque le plan moyen de la lentille coïncide avec l'écran, c'est-à-dire lorsqu'on a $\delta = 0$; elle est de même nulle si $p = 0$, c'est-à-dire si la source lumineuse est au centre optique de la lentille. Cette action affaiblissante est maximum pour une position intermédiaire déterminée en égalant à zéro la dérivée de d' par rapport à δ.

On obtient alors $\delta = \frac{d}{2}$, d'où l'on conclut que le maximum d'action dispersive se produit lorsque la lentille est placée à égale distance de la source lumineuse et de l'écran.

Dans les calculs ci-dessus, on a fait abstraction de l'affaiblissement des rayons lumineux dû à l'absorption et à la réflexion de ces rayons, produits par la lentille. On pourrait, au premier abord, admettre que ces causes d'affaiblissement sont insensibles, vu la faible épaisseur de la lentille divergente, surtout dans sa partie centrale.

C'est, d'ailleurs, ce que MM. Aryton et Perry ont fait en établissant les formules de leur photomètre à dispersion. Cependant des mesures précises effectuées depuis permettent de conclure que l'action affaiblissante due aux réflexions sur la lentille et à l'absorption, atteint souvent une valeur de 5 à 8 p. 100.

On a pu constater, en outre, que l'affaiblissement du faisceau lumineux, causé par la lentille, provient surtout des phénomènes de réflexion et nullement des phénomènes d'absorption; l'affaiblissement est, en effet, le même avec des plaques de verre d'épaisseurs différentes, qu'avec des lentilles.

Voici, par exemple, les rapports des éclairements observés sur l'écran par M. Voller (1) et obtenus avec et sans lentille, pour divers foyers lumineux; les résultats obtenus avec des plaques de verre d'épaisseurs différentes terminent le tableau.

	LENTILLE ($f = 18$ cm.)	LENTILLE ($f = 50$ cm.)	PLAQUES DE VERRE DE		
			1 mm.	2mm,9.	4mm,8.
Bougie	»	»	0.923	0.916	0.923
Lampe à pétrole	»	»	0.914	»	0.910
Bec de gaz	0.966	0.933	0.902	0.918	0.910
Lampe à incandescence	0.937	0.900	»	»	»

(1) *Abhandl. des Naturwiss. ver. zu Hamburg* (7), II, p. 40.

Le résultat de ces mesures montre donc qu'il faut déterminer expérimentalement le facteur d'affaiblissement d'une lentille donnée avant de l'employer dans les comparaisons photométriques; on peut cependant éliminer cette réduction en compensant l'action affaiblissante de la lentille par l'insertion sur le trajet des rayons lumineux de l'étalon photométrique de plaques d'épaisseur équivalente.

Méthode photométrique de M. Cornu.

37. Cette méthode (1) est basée sur la propriété suivante des lentilles convergentes, découverte et utilisée déjà par Bouguer : si l'on forme, avec une lentille convergente, une image réelle d'une source lumineuse, et si l'on modifie l'ouverture de l'objectif en plaçant un diaphragme plus ou moins grand, la grandeur et la position de l'image ne sont pas modifiées; par contre, l'intensité d'éclairement de l'image est proportionnelle à la surface d'ouverture du diaphragme, pourvu que cette ouverture soit toujours petite vis-à-vis de sa distance au foyer lumineux. Cette dernière propriété est évidente, puisque la quantité de lumière qui concourt à la formation de l'image est proportionnelle à la surface de la lentille, rencontrée par les rayons incidents.

Comme diaphragme, M. Cornu utilise le dispositif suivant, connu sous le nom d'*œil de chat*. Il est formé par deux plaques métalliques glissant l'une sur l'autre par l'effet d'un pignon commun à deux crémaillères CC' (fig. 25) portant chacune une ouverture carrée AB, A'B'.

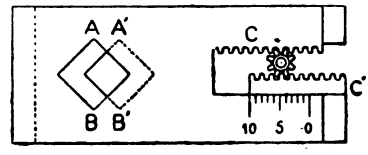


Fig. 25.

Dans une de leurs positions extrêmes, les deux carrés sont en coïncidence, et une ouverture carrée maximum livre passage à la lumière; dans l'autre position extrême, l'ouverture de l'une des plaques est cachée par la partie pleine de l'autre, de sorte qu'aucune lumière ne peut passer; dans les positions intermédiaires, l'ouverture libre a la forme carrée, quelle que soit sa dimension. En outre, comme le pignon est fixe, et que la rotation de ce pignon fait avancer l'une des plaques autant que l'autre recule, le centre d'un carré variable reste fixe devant le centre optique de la lentille. Par conséquent, la surface de l'ouverture est toujours proportionnelle au carré de la diagonale, dont la longueur est égale au déplacement des plaques mobiles, mesuré sur la graduation de l'appareil.

Le moyen le plus simple d'utiliser cette méthode consiste à employer deux objectifs identiques, munis de ces diaphragmes et disposés de manière que leurs axes optiques se croisent au double environ de leur distance focale commune; chacun d'eux produit, sur un écran blanc, l'image

(1) *Journal de physique*, X, p. 186. — *Lum. él.*, vol. III, p. 221.

du diaphragme correspondant, devant lequel se trouve l'une des sources que l'on veut comparer.

Le diaphragme de la source d'éclat minimum étant ouvert au maximum, on règle l'ouverture du second jusqu'à ce qu'il y ait égalité d'éclairement des deux images.

Pour mieux constater ce moment, on règle l'appareil de manière que les images des diaphragmes soient en contact par un de leurs bords; ce bord disparaît alors au moment de l'égalité.

Cet appareil permet de mesurer aisément l'intensité intrinsèque d'une source de lumière en divers points, en employant, par exemple, un foyer lumineux auxiliaire.

M. Cornu a donné à son appareil une autre disposition qui est plus pratique et plus générale et qui supprime l'écran.

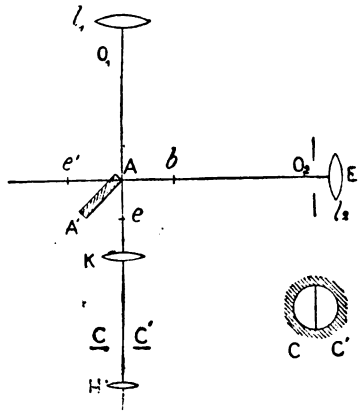


Fig. 26. — Dispositif de M. Cornu.

La glace sans tain (fig. 26) est remplacée par une glace de verre noir AA', terminée par une arête rectiligne A normale au plan des axes principaux des objectifs. Les plans focaux sont réglés de manière à passer rigoureusement par cette arête. Un microscope à faible grossissement permet de voir simultanément, de part et d'autre de l'arête rectiligne, les deux images des deux sources. En réglant convenablement la position des sources, on arrive à amener les deux plages à comparer en contact avec l'arête. Pour rendre la comparaison encore plus précise, on isole les deux plages à l'aide d'un diaphragme circulaire CC', introduit dans le plan focal de l'oculaire du microscope. Le champ visible consiste alors en un petit cercle séparé en deux moitiés égales par la ligne presque invisible formée par l'arête; l'une des moitiés présente une intensité fixe, l'autre une intensité qu'on rend variable à l'aide de l'écran photométrique : ce sont les meilleures conditions pour obtenir l'égalité des deux intensités. Dans ces circonstances, et surtout si l'on a soin d'atténuer les intensités jusqu'à une certaine limite, l'œil acquiert une si grande sensibilité que les moindres différences de composition des lumières se traduisent par une différence de teinte qui devient gênante dans l'appréciation de l'égalité ; il n'y a que les sources rigoureusement identiques ou monochromatiques qui donnent une impression d'égalité absolument satisfaisante.

Les plages à comparer peuvent être extrêmement petites, si les images focales sont bien pures et obtenues à l'aide d'objectifs achromatiques, le

microscope qui sert d'oculaire peut les amplifier dans de grandes proportions ; l'appareil est alors susceptible de mesurer l'éclat d'images extrêmement petites.

L'appareil ci-dessus ne donne que les éclats intrinsèques des différentes régions des sources que l'on étudie.

Pour comparer les intensités totales, il faut faire usage d'écrans diffusants sur lesquels on fait tomber la lumière des sources à étudier, et qu'on place immédiatement devant les diaphragmes des deux lentilles.

Photomètre de M. Napoli.

38. Ce photomètre (1) met en pratique d'une manière très ingénieuse les principes de la diaphragmation.

Soit un disque percé d'un trou à une distance quelconque du centre, et plaçons un foyer lumineux en regard de ce trou; si l'on fait tourner ce disque, l'image se déplace circulairement sur le disque, et forme, par suite de la persistance de l'image sur la rétine, un anneau uniformément éclairé.

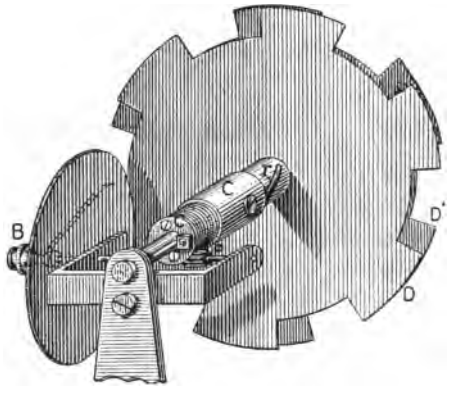


Fig. 27.

L'éclairement de cet anneau est indépendant de la vitesse du disque, et ne dépend que de la surface du trou, c'est-à-dire de la surface du diaphragme L'anneau sera donc plus ou moins éclairé, suivant que la surface du trou sera augmentée ou diminuée, et l'intensité de l'éclairement sera proportionnelle à la grandeur de l'ouverture.

La figure 27 représente l'organe principal du photomètre, savoir deux disques D et D′ de même diamètre, juxtaposés et échancrés en créneaux sur leur pourtour; ils se meuvent l'un sur l'autre, de façon à pouvoir présenter des espaces vides ou des pleins plus ou moins grands, à la volonté de l'observateur.

Un des disques est calé sur un axe mis en rotation par une manivelle, un volant et une corde sans fin.

Le second disque D′ est mobile sur l'axe du disque D, et porte un cylindre à rainure hélicoïdale, sur laquelle s'engage un pivot tenu sur le

(1) *Séances de la Soc. de phys.*, 1880, p. 53. — *Lum. él.*, vol. II, p. 133.

manchon *c*, lequel, au moyen d'un clavetage, peut se mouvoir longitudinalement dans une seconde rainure pratiquée sur l'axe du disque D, et suivant une génératrice; ce manchon, terminé par une crémaillère circulaire, est actionné par le bouton B et le pignon P.

En tournant le bouton B, la crémaillère avance ou recule, et le disque D se déplace sur D' ; le pas-de-vis de la rainure est calculé de telle façon que, pour une course du manchon, les deux disques doivent passer du recouvrement complet interceptant la lumière, à celui où tous les créneaux sont ouverts. Une aiguille fixée à l'axe du pignon en B indique, sur un cadran, l'ouverture des créneaux.

L'appareil est monté en connexion avec un écran de Foucault; l'une des moitiés de celui-ci est éclairée par la lumière étalon, l'autre par la lumière du foyer à étudier, affaiblie dans le rapport indiqué par l'aiguille de l'appareil. Il suffit de déplacer le bouton B, jusqu'au moment où les deux plages de l'écran sont également éclairées.

Il convient de rappeler que le même principe a été appliqué, à peu près à la même époque, à la construction de photomètres, par M. Guthrie (1) en Angleterre, et Hammerl (2) en Allemagne.

Photomètre à dispersion d'Ayrton et Perry.

39. Ce photomètre (3) est basé sur les propriétés des lentilles divergentes. L'égalité des éclairements est constatée au moyen de la méthode de Rumford.

Le corps opaque dont on constate l'égalité des ombres est une tige placée vis-à-vis d'une feuille de papier blanc; l'étalon photométrique est mobile sur une règle graduée. La source lumineuse à étudier (lampe électrique) émet ses rayons sur un miroir plan, qui les réfléchit sur une lentille concave; celle-ci les disperse, et réduit l'éclairement produit dans un rapport facile à calculer, de manière à obtenir, sans déplacer le foyer, l'égalité des deux éclairements.

Le miroir fait un angle de 45° avec son axe de rotation; il est perpendiculaire au disque et à l'axe de la lentille; il en résulte que tous les rayons réfléchis par le miroir, et passant par le centre de la lentille, ont le même angle d'incidence, 45°, et partant, subissent la même absorption, quelle que soit la position du foyer lumineux par rapport au miroir.

En outre, la valeur spéciale de cet angle, 45°, fait que l'angle dont il faut tourner le disque gradué, pour faire réfléchir un faisceau de lumière d'abord horizontal, puis incliné, donne immédiatement cette inclinaison. L'ensemble de l'appareil peut tourner autour d'un axe, de manière que

(1) *Chem. News.*, vol. XLIX, p. 262.
(2) *Elektr. Zeitschrift*, vol. IV, p. 262.
(3) *Phil. Mag.* (5), vol. VIII, p. 117 et vol. IX, p. 45.

le faisceau réfléchi par le miroir et réfracté par la lentille se projette sur le milieu de l'écran.

Quant à l'intensité lumineuse I du foyer étudié, en adoptant comme unité l'étalon employé, et en appliquant les formules relatives à la dispersion par les lentilles, on obtient :

$$I = \frac{1}{\delta'}\left[x + \frac{\delta(x-\delta)}{f}\right]^2$$

en désignant par :

f la distance focale de la lentille;

r la distance horizontale du foyer lumineux au miroir;

r' la distance du miroir à l'écran;

θ l'angle d'élévation du foyer, ou l'inclinaison de son faisceau lumineux dirigé vers le miroir;

x la quantité $x = r' + r \sec \theta$;

δ la distance de la lentille à l'écran ;

δ' la distance de l'étalon photométrique au moment de l'égalité des ombres.

Il faut appliquer aux résultats obtenus de cette manière la correction destinée à tenir compte de l'affaiblissement produit par les réflexions sur les surfaces de la lentille.

Méthode photométrique de M. Crova.

40. La méthode photométrique de M. Crova (1) est une méthode de diaphragmation combinée avec l'emploi d'un écran diffuseur, sur lequel tombe la lumière des sources que l'on compare.

Sur une lame de verre dépoli, de verre opale, ou sur un écran Foucault, on fait tomber normalement les rayons émis, soit par la source à mesurer L_1, soit par la source étalon L_2.

Chacun des points du diffuseur peut être considéré comme une source lumineuse, et émet, en arrière, une lumière dont l'intensité dépend de la nature du diffuseur; mais, quelle que soit cette loi, les rayons diffusés dans des directions très voisines de la normale ont une égale intensité, si le diffuseur est bien homogène, quel que soit le point dont ils émanent.

On place alors, derrière le diffuseur, un écran opaque muni d'une fente de largeur variable à volonté. L'intensité de l'éclairement en un point de l'écran est alors proportionnelle à la surface du diffuseur. En faisant varier la surface de celui-ci, à l'aide de la fente de largeur variable du diaphragme, on peut rendre cet éclairement égal à celui d'une autre partie du même écran, éclairée par une source auxiliaire constante.

Lorsqu'on compare des sources lumineuses d'intensités très différentes,

(1) *Comptes rendus*, vol. XCIX, p. 1067.

on est obligé de les placer à des distances différentes du diffuseur; car, si la distance était la même pour les deux sources, il faudrait, pour le foyer intense, par exemple, donner à l'ouverture du diaphragme une surface très petite, ce qui pourrait donner lieu à des phénomènes de diffraction. Cette nécessité de placer les deux luminaires à des distances différentes D_1 et D_2 du diffuseur ne complique pas la méthode; S_1 et S_2 représentant la surface du diaphragme dans les deux cas, on a :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_2}{S_1}\frac{D_1^2}{D_2^2}.$$

Cette méthode a donné de bons résultats dans la comparaison des lampes à arc, par exemple. L'appareil utilisé par M. Crova se compose d'un écran Foucault vertical, dont une moitié est éclairée par une lampe Carcel qui sert d'étalon intermédiaire. Cette lampe est placée dans une boîte noircie, munie d'un large tube horizontal de 50 centimètres de longueur, également noirci à l'intérieur, et qui laisse arriver la lumière sur l'écran sous une incidence de 45°.

L'autre moitié de l'écran Foucault reçoit la lumière du diffuseur, qui est situé à l'extrémité d'un tube horizontal de même longueur que le précédent, auquel il est perpendiculaire; de cette manière, les deux portions de l'écran reçoivent la lumière sous la même incidence de 45°.

Comme nous l'avons dit, immédiatement derrière le diffuseur se trouve le diaphragme, dont on fait varier la surface au moyen d'une vis micrométrique. Enfin, la planche sur laquelle le photomètre est fixé peut tourner autour d'un axe vertical, de manière à pouvoir placer le tube portant le diffuseur dans tous les azimuts.

L'appareil imaginé par M. Crova permet également de mesurer les intensités lumineuses dans une direction quelconque. A cet effet, le tube à l'extrémité duquel se trouve le diffuseur peut se mouvoir dans un plan vertical, perpendiculaire à l'axe du tube contenant la lampe. Un cercle divisé, fixé sur ce dernier tube, permet de lire l'angle de la normale du diffuseur avec l'horizon; la valeur de cet angle permet de calculer le rapport des intensités I_1 et I_2.

Supposons que, pour la mesure de I_1, le diffuseur soit vertical, tandis que sa normale fasse l'angle i avec l'horizon dans la mesure de I_2; on aura, pour un éclairement uniforme de l'écran :

$$\frac{I_1}{D_1^2} S_1 \cos 45^\circ = \frac{I_2}{D_2^2} S_2 \cos 45^\circ \cos i$$

d'où

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_2}{S_1}.\frac{D_1^2}{D_2^2} \cos i.$$

Il faut remarquer que le photomètre à diffusion de M. Crova suppose un écran diffuseur parfait; pour la construction de ce dernier, nous renvoyons aux détails que nous avons donnés sur la construction de l'écran

de Foucault (§ 20). Une condition essentielle du photomètre de M. Crova est, en outre, la nécessité de prendre des diffuseurs d'autant plus opaques que les sources à comparer sont plus intenses.

Photomètre de M. Mascart.

41. Cet appareil (1) utilise à la fois des diffuseurs et des lentilles munies de diaphragmes; il permet de comparer des sources d'intensités très différentes, et de mesurer les intensités des rayons lumineux de direction quelconque sans mesurer d'angles.

La lumière incidente frappe l'écran de Foucault D, le traverse, se réfléchit sur une glace M, qui la renvoie dans l'axe de l'appareil (fig. 28).

Une lentille C, placée contre le diaphragme mobile, et éloignée de l'écran à une distance double de sa distance focale principale, produit l'image de cet écran D sur un écran de Foucault E.

De la lampe L, dont on règle la hauteur de flamme au moyen d'une

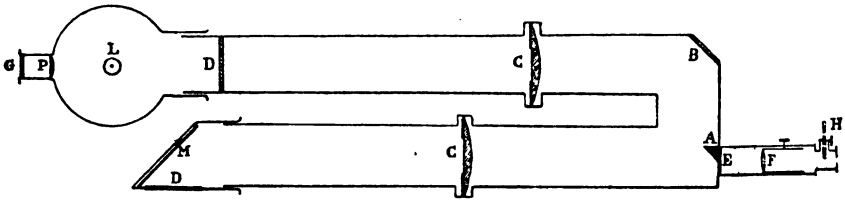


Fig. 28. — Photomètre de Mascart.

projection sur un verre dépoli G, émane un faisceau de lumière qui est concentré par une lentille sur un écran de Foucault D, de même dimension que le premier.

Une lentille C, située contre le second diaphragme mobile, et écartée de l'écran à une distance double de sa distance focale principale, donne l'image de cet écran sur E, après avoir été réfléchie par la glace B et le prisme A.

Une lentille de mise au point F fait voir nettement l'écran de Foucault E, sur lequel se projettent les deux faisceaux, chacun d'eux occupant la moitié du disque.

On corrige l'effet de la différence de coloration au moyen du diaphragme H, composé de verres de couleurs variées, qui permet d'égaliser la teinte des lumières. On opère pratiquement comme suit.

Après avoir allumé la petite lampe dont on règle la hauteur de flamme au moyen de sa projection sur le verre dépoli, on dispose l'appareil de

(1) *Bull. de la Soc. int. des Electriciens*, 1888, p. 103. — *Bull. d. sc. phys.*, vol. I, p. 250.

manière que l'écran D reçoive normalement la lumière de la lampe étalon L, placée à 1 mètre de distance de cet écran.

On modifie ensuite la surface des ouvertures des diaphragmes jusqu'à ce que les éclairements des deux moitiés de l'écran E soient égaux; ces ouvertures étant rectangulaires, leur surface est proportionnelle à leur largeur n, lue directement sur une échelle divisée. L'intensité de la lampe auxiliaire étant I_0, on a alors :

$$\alpha I_0 n'_1 = \beta I_1 n_1.$$

On répète ensuite la même expérience avec le luminaire L_2 dont on veut mesurer l'intensité I_2; on a alors :

$$\alpha I_0 n'_2 = \frac{\beta I_2}{D^2} n_2,$$

D étant la distance du foyer L_2 à l'écran diffuseur. On a alors :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1 n'_2}{n'_1 n_2} D^2.$$

Dans le photomètre de Mascart, comme dans celui de Crova, on a admis que la quantité de lumière émise par un diffuseur en direction normale est proportionnelle à sa surface et à la quantité de lumière qu'il reçoit. Cette hypothèse a été confirmée par des mesures directes de M. Mascart, et son exactitude a été constatée avec des écarts inférieurs à 3 p. 100. Il en résulte donc que le rapport $\frac{n_1}{n'_1}$ doit varier en raison inverse du carré de la distance, puisque la quantité de lumière reçue par le diffuseur varie de la même manière. On peut donc déterminer ce rapport une fois pour toutes, c'est-à-dire prendre l'intensité de la lampe de l'appareil comme étalon intermédiaire.

Outre l'appareil précédent, M. Mascart a fait construire, par M. Pellin, un petit appareil pouvant être tenu à la main, dans lequel la source lumineuse auxiliaire est une petite lampe à huile minérale. En outre, les diaphragmes à fentes sont remplacés par des disques percés de trous de grandeurs inégales; l'éclairement des deux portions de l'écran E varie alors par sauts brusques, mais sans qu'il en résulte des inconvénients.

Emploi de milieux absorbants.

42. On peut aussi égaliser les éclairements des deux moitiés de l'écran photométrique en plaçant, sur le passage des rayons lumineux de l'une des deux sources que l'on compare, des milieux plus ou moins opaques qui absorbent une partie de la lumière. On peut employer avec succès des verres fumés d'épaisseurs et de teintes différentes. Avant d'utiliser ces verres, on détermine avec soin leur pouvoir absorbant. Pour égaliser avec exactitude les éclairements des deux moitiés de l'écran, il faut inter-

caler des verres choisis convenablement. Mais en procédant de cette manière ces éclairements ne varient pas d'une façon continue.

Pour élimininer cet inconvénient, M. Sabine (1) a proposé d'employer un seul verre fumé taillé en biseau, dont le pouvoir absorbant varie avec l'épaisseur. En enfonçant peu à peu ce coin sur le trajet du faisceau lumineux provenant de la source à comparer, on fait varier l'éclairement de l'écran d'une manière continue. Le degré d'enfoncement du coin dans sa rainure est mesuré sur une échelle divisée ; il donne immédiatement l'affaiblissement correspondant du faisceau lumineux, déterminé au préalable, une fois pour toutes. Le photomètre de M. Sabine comporte en outre un diaphragme dont la disposition n'offre rien de particulier.

L'emploi du coin absorbant offre un inconvénient sérieux. L'intensité lumineuse n'est pas affaiblie d'une manière égale sur toute la section du faisceau lumineux, par suite de l'inégale épaisseur du coin. L'écran photométrique n'est donc pas éclairé uniformément par les rayons lumineux affaiblis par le coin. M. Spitta (2) a supprimé cet inconvénient en remplaçant le coin par deux lames taillées en biseau et assemblées par leurs faces hypoténuses. En déplaçant les deux lames l'une contre l'autre, l'épaisseur totale varie, mais elle reste constante sur une certaine longueur, plus grande que la largeur du faisceau lumineux. L'absorption de cette lame double est déterminée préalablement pour les différentes positions des deux moitiés superposées, il suffit de lire ensuite sur une échelle divisée la position de ces deux lames pour en déduire l'absorption.

Cette disposition n'a pas encore été employée dans un appareil industriel; mais elle est ingénieuse et mérite d'être signalée à cause des applications dont elle est susceptible.

L'affaiblissement des rayons lumineux par les milieux absorbants peut donner d'excellents résultats lorsque les luminaires que l'on compare émettent de la lumière de même teinte. Si ce n'est pas le cas, l'absorption n'est plus égale pour les deux foyers ; il se produit alors des actions secondaires dont il est difficile de tenir compte et qui compliquent beaucoup les mesures.

C. — Photomètres a polarisation et a compensation.

43. Dans les photomètres décrits précédemment, on a égalisé les éclairements des deux plages de l'écran, soit en variant la distance ou l'inclinaison des rayons lumineux, soit en interposant, sur le trajet de ces derniers, des lentilles de dispersion, des diaphragmes ou des milieux

(1) *Phil. Mag.* (5), vol. XV, p. 22.
(2) *Proceedings of the Royal Society*, London, vol. XLVII, p. 15, 1889.

absorbants. Outre ces moyens divers de diminuer l'intensité d'un faisceau lumineux, il en existe encore un, basé sur les propriétés de la lumière polarisée.

Rappelons, en quelques mots, les propriétés de la lumière polarisée. On sait que la lumière est le résultat des vibrations transversales de l'éther. Dans le cas de la lumière naturelle, ces vibrations ont lieu dans tous les sens, dans un plan perpendiculaire à la direction de la propagation.

Si l'on fait passer un rayon de lumière solaire au travers d'un rhomboèdre de quartz, il est décomposé en deux rayons distincts : le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire. Ces rayons sont dits polarisés. Les ondulations de l'éther se produisent toujours normalement à la direction de sa propagation, mais elles ont lieu pour chaque rayon dans une seule direction, au lieu de s'effectuer dans tous les sens.

Dans le rayon ordinaire les ondulations se font dans un plan perpendiculaire au plan renfermant le rayon incident et la normale à la surface du cristal. Dans le rayon extraordinaire les ondulations ont lieu dans le plan du rayon incident et de la normale à la surface du cristal.

Un rayon de lumière naturelle peut donc être considéré comme constitué par deux autres rayons indépendants dont l'intensité est égale à la moitié de celle du rayon naturel et qui sont polarisés perpendiculairement et parallèlement au plan d'incidence.

On sait que le prisme analyseur de Nicol est formé d'un rhomboèdre de spath d'Islande coupé en deux suivant un plan perpendiculaire au plan des grandes diagonales des bases et passant par les sommets obtus les plus rapprochés l'un de l'autre; les deux moitiés sont ensuite recollées à l'aide de baume du Canada, dont l'indice de réfraction est plus petit que l'indice extraordinaire du spath d'Islande, mais plus grand que l'indice ordinaire. Il en résulte que le rayon ordinaire éprouve sur la surface de séparation une réflexion totale, de telle sorte que le prisme ne laisse passer que le rayon extraordinaire.

Si l'on reçoit ce rayon polarisé sur un second nicol dont la section principale fait avec celle du premier un angle α, l'intensité lumineuse I' du rayon qui sort du second nicol est reliée à celle du rayon qui sort du premier par la loi de Malus :

$$I' = I \cos^2 \alpha.$$

En faisant varier α de 90° à 0, on pourra faire varier I' de 0 à I, d'une manière bien déterminée. On a ainsi un procédé précis pour faire varier l'intensité lumineuse d'un faisceau lumineux donné, polarisé au préalable.

Photomètre de Duboscq.

44. Les photomètres de polarisation sont fondés sur ce principe. Le

premier en date est celui d'Arago (1), basé sur une propriété de la lumière polarisée qu'il venait de découvrir : lorsqu'un faisceau de lumière naturelle tombe sur une pile de glaces, la quantité de lumière polarisée par réflexion est égale à la quantité de lumière polarisée par réfraction.

M. Duboscq (2) a construit un appareil basé sur le même principe et qui a été attribué à tort à M. Babinet. Voici la description de cet appareil (fig. 29). Les foyers lumineux L_1 et L_2 sont placés derrière des glaces de verre dépoli ; les rayons qu'ils émettent rencontrent une pile de glace Pqui envoie dans la direction de l'œil la lumière réfléchie venant de L_1 et réfractée venant de L . Ces lumières sont partiellement polarisées dans des azimuts rectangulaires ; si leurs intensités sont égales, les quantités de lumière polarisée qu'elles contiennent reproduisent de la lumière naturelle. On constate l'absence de polarisation à l'aide du polariscope de Savart, composé de la plaque à deux rotations Q et de l'analyseur N.

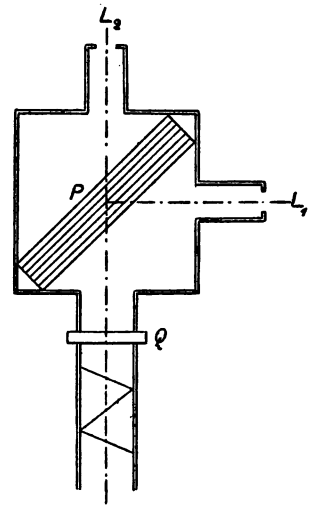


Fig. 29. — Photomètre de Duboscq.

On fait varier la distance du foyer lumineux inconnu L_2 jusqu'à ce qu'on ait atteint ce résultat. On a alors, en désignant par d_1 et d_2 les distances des luminaires aux diaphragmes, et par I_1 et I_2 leurs intensités :

$$I_2 = \frac{d_2^2}{d_1^2} I_1.$$

Photomètre à polarisation de Wild.

45. Le photomètre à polarisation de Wild (3) est le seul qui ait été spécialement combiné pour les mesures industrielles. Le premier modèle de ce photomètre date de 1859, mais M. Wild en a étudié dernièrement un modèle industriel que construit M. Pfister, à Berne (4).

Les sources à comparer S et S′ sont placées dans la direction des axes des tubes A et B (fig. 30) qui font entre eux un angle de 70°50′, double du complément de l'angle de Brewster (54° 35′). Les faisceaux lumineux

(1) *Comptes rendus*, vol. XIII, p. 84, 967.
(2) *Cours de physique*, par Jamin et Bouty, vol. III, fasc. 3, p. 579.
(3) *Annales de Poggendorf*, vol. XCIX, p. 235; vol. CXVIII, p. 193.
(4) *Mélanges physiques de Saint-Pétersbourg*, vol. XII. — *Bull. des sc. phys.*, vol. I, p. 578.

envoyés par chacune d'elles traversent les diffuseurs en verre opale D, D, puis les nicols polariseurs P, P solidaires des cercles divisés C, C que l'on peut faire tourner devant des verniers fixes au moyen de tiges *b*, *p*. Ils rencontrent ensuite une pile de glaces GG dirigée suivant la bissectrice de l'angle formé par les axes des tubes A et B, et avec les faces de laquelle ils font, par conséquent, un angle de 35°25′. Les portions réfléchies des faisceaux sont donc polarisées dans le plan d'incidence, les portions transmises dans le plan perpendiculaire.

La portion réfléchie du faisceau A et la portion transmise de B tombent sur une lunette L portée par un tube F diamétralement opposé à B. Cette lunette comprend, outre l'objectif et l'oculaire, une double lame de quartz S et un nicol N dont l'ensemble constitue un polariscope de Savart; elle peut être facilement détachée du tube F et adaptée au tube E, diamétra-

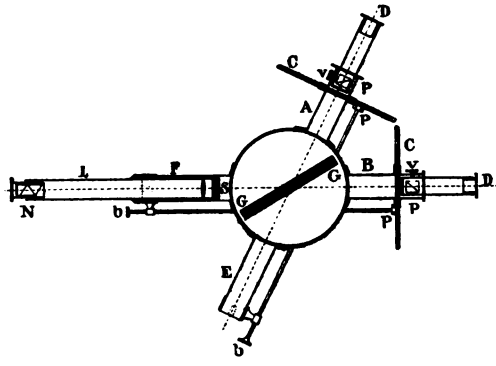


Fig. 30. — Photomètre de Wild.

lement opposé à A et dans lequel tombent la portion transmise du faisceau A et la portion réfléchie du faisceau B.

Pour se servir de l'appareil, on commence par amener la section principale de l'une des lames du polariscope dans le plan d'incidence des rayons qui tombent sur la pile de glaces. On y parvient en fermant l'ouverture A et faisant tourner la lunette jusqu'à ce que les franges disparaissent. A ce moment, la section principale d'une des lames coïncide avec le plan de polarisation de la portion du faisceau B qui se réfracte à travers la pile de glaces; par conséquent, la section principale de l'autre lame est dans le plan d'incidence.

On fait alors tourner le cercle C du tube B de manière à placer le zéro de la graduation en face du zéro du vernier, puis après avoir desserré la vis *v*, on tourne le polariseur P jusqu'à extinction complète dans la lunette; dans cette position, le plan de polarisation du faisceau qui traverse P est dans le plan d'incidence. On règle de la même manière le polariseur du tube A en plaçant la lunette en F.

Une simple lecture sur les cercles divisés suffit alors pour connaître les angles que forment avec le plan d'incidence les plans de polarisation des faisceaux qui sortent des polariseurs.

Ce réglage effectué, on procède à la comparaison des intensités des sources L_1 et L_2. Remarquons que, pour une position quelconque des polariseurs, le faisceau transmis par la pile et provenant de B n'a pas la même intensité que le faisceau réfléchi et provenant de A. Ces deux faisceaux polarisés à angle droit agissent sur le polariscope comme de la lumière naturelle partiellement polarisée, et comme ils sont un peu divergents, des franges apparaissent. Elles disparaissent quand les deux faisceaux ont la même intensité. Si α_1 et α_2 sont alors les angles que forment les plans de polarisation des polariseurs de A et de B avec le plan d'incidence, d_1 et d_2 les distances des sources d'intensité I_1 et I_2 aux diffuseurs D, l'intensité du faisceau réfléchi est $\frac{I_1}{d_1^2} A \cos^2\alpha_1$, et celle du faisceau transmis $\frac{I_2}{d_2^2} B \sin^2\alpha_2$, A et B étant les coefficients d'affaiblissement de la lumière à travers les diffuseurs et les polariseurs; on a donc :

$$\frac{I_1}{d_1^2} A \cos^2\alpha_1 = \frac{I_2}{d_2^2} B \sin^2\alpha_2$$

d'où

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \frac{B}{A} \frac{\sin^2\alpha_2}{\cos^2\alpha_1},$$

relation qui donne le rapport des intensités quand on connaît celui des coefficients A et B. Ce dernier rapport qui, théoriquement, devrait être égal à l'unité quand les diverses parties des tubes A et B sont identiques, se détermine expérimentalement, une fois pour toutes, en intervertissant la position des sources par rapport aux tubes et en cherchant les valeurs nouvelles de α_1 et α_2 qui font disparaître les franges. En écrivant que les intensités des faisceaux tombant sur la lunette sont alors égales, on obtient une relation qui, jointe à la précédente, permet d'éliminer le rapport des intensités et de calculer $\frac{A}{B}$.

La méthode du photomètre de Wild repose donc sur le phénomène de la disparition des franges dans deux faisceaux superposés d'égale intensité et polarisés à angle droit. Cette méthode permet, d'après M. Wild, de comparer les intensités de deux lumières avec une approximation de 1/500 à 1/1000. Sa sensibilité est donc bien plus grande que celle de l'écran de Bunsen. Elle a par contre l'inconvénient de fatiguer la rétine, à cause de la persistance des impressions lumineuses, et d'exiger une grande attention, car l'œil voit souvent les franges après qu'elles ont disparu, et ce n'est qu'après un moment de repos que l'on peut réellement s'as-

surer de leur disparition. C'est pourquoi l'exactitude de cette méthode est en réalité plus faible que la valeur précédente.

Méthode de compensation de M. Wybauw.

46. Cette méthode (1) diffère complètement des méthodes précédentes; elle consiste essentiellement en ceci : l'une des deux faces du photomètre dont les éclairements doivent être comparés, reçoit comme d'ordinaire la lumière de la source lumineuse qu'on veut étudier, du foyer électrique par exemple. L'autre face ne reçoit qu'une fraction connue ou facile à calculer de cette même lumière, fraction à laquelle on ajoute autant de lumière émise par l'étalon photométrique qu'il est nécessaire pour que les éclairements des deux faces du photomètre deviennent égaux.

M. Wybauw a fait une application pratique de son idée en construisant un photomètre, genre Foucault. Dans cet appareil, grâce à une disposition ingénieuse des miroirs, la trajectoire parcourue par les rayons lumineux projetés sur une des surfaces à éclairer est augmentée dans un rapport convenable, relativement à la trajectoire des rayons lumineux projetés sur l'autre surface; une lampe Carcel sert ensuite à égaliser la différence ainsi obtenue dans les éclairements des deux surfaces.

Photomètre à compensation de Krüss.

47. M. Krüss a réalisé l'idée de M. Wybauw d'une manière assez pratique en employant le photomètre de Bunsen (2).

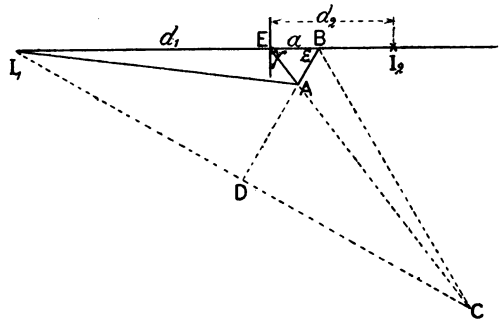


Fig. 31. — Photomètre à compensation.

Soient I_1 et I_2 les deux sources de lumière à comparer, E l'écran photométrique, BD un miroir dont le plan fait un angle ε avec la droite $I_1 I_2$. L'écran photométrique E reçoit alors, d'une part la lumière qui vient directement de la source I_1, d'autre part la lumière de cette même source

(1) *Bull. de la Soc. belge des électriciens*, vol. II, n° 5.
(2) *Lum. él.*, vol. XIX, p. 118.

qui vient frapper le miroir BD et se réfléchit suivant le chemin I_1AF, et enfin les rayons directs de la source I_2.

Il est facile de déterminer la formule exacte de l'appareil. La formule que M. Krüss a donnée dès le début a été modifiée avantageusement par M. Strecker (1). Nous nous bornerons à donner les résultats de ce dernier sans entrer dans le détail des calculs, car, depuis l'invention du photomètre à mélange de Grosse, qui résout le problème de la compensation d'une manière plus parfaite, le photomètre à compensation de Krüss a perdu de son importance.

Voici les conclusions de M. Strecker. En désignant par a la distance horizontale de l'axe de rotation du miroir BD à l'écran F, il faut que l'angle ε soit compris entre 60° et 70° et que la distance du luminaire inconnu I_1 à l'écran soit comprise entre 10 a et 15 a. Dans ces conditions, la formule à employer est

$$I_1 = I_2 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 k . \frac{1}{1 + \frac{ak\varphi}{d_1}}$$

dans laquelle

$$k = \frac{1}{1 + \sigma \cos 2\varepsilon}.$$

Le coefficient d'absorption du miroir (1 p. 100 environ) est représenté par σ et φ représente une constante dont les valeurs sont : pour

$\varepsilon =$	60°	65°	70°	75°
$\varphi =$	8,8	17	25	31

Le coefficient k ne doit pas être supérieur à 3.

Photomètre à mélange de Grosse.

48. Ce photomètre (2) repose à la fois sur l'emploi de la méthode de compensation de M. Wybauw et sur les phénomènes de polarisation.

Il comprend un prisme P (fig. 32) en spath, formé de deux prismes isocèles rectangles *abd*, *bcd*, séparés par une mince couche d'air et taillés par rapport à l'axe optique du cristal de telle façon que le rayon ordinaire provenant d'un rayon incident normal à l'une des faces soit totalement réfléchi sur le plan diagonal *bd*. Il en résulte que le faisceau incident V donnera, suivant la direction UR_1 un faisceau polarisé perpendiculairement au plan d'incidence et que le faisceau incident T donnera suivant cette même direction un faisceau polarisé dans le plan d'incidence. Dans le photomètre de M. Grosse les faisceaux qui sortent du prisme P tombent sur un nicol N (fig. 33) dont la section principale

(1) *Elektr. Zeitschrift*, 1887.

(2) *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 1888, pp. 93, 129, 347; *Lum. él.*, vol. XXXI p. 221 et *Bull. des sc. phys.*, vol. I, p. 583.

fait avec le plan de la figure un angle mesuré par le déplacement devant le cercle divisé KK_1 d'un index solidaire du tube M. Des prismes à réflexion totale A, B, C, D, réfléchissent dans des directions convenables les rayons qui traversent les lames de verre mat G et H coupées dans la même plaque et éclairées par les sources à comparer. Enfin des écrans E et F, glissant dans deux rainures, permettent de limiter les faisceaux lumineux qui pénètrent dans l'instrument.

Si les écrans sont dans la position indiquée sur la figure, la moitié gauche R du champ de l'instrument est éclairée par les faisceaux Σ et Σ'_1 provenant, le premier de la source S, le second de la source S_1. L'autre moitié T du champ est éclairée par les faisceaux Σ' et Σ_1. Ces faisceaux ont la même section, et, par conséquent, découpent sur les

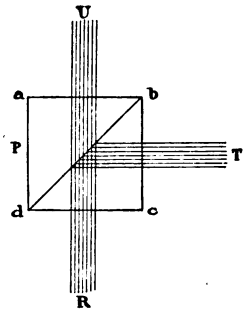


Fig. 32.

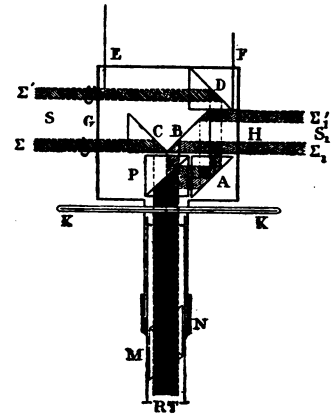


Fig. 33.

lames de verre dépoli G et H des surfaces égales g, g', h, h' dont on peut prendre l'aire pour unité. Les faisceaux Σ et Σ'_1 subissant les mêmes transformations ont le même coefficient d'affaiblissement A ; pour une raison semblable, les faisceaux Σ et Σ_1 ont le même coefficient d'affaiblissement B. Si donc nous désignons par I et I_1 les intensités des sources, par d et d_1 leurs distances aux lames G et H et par α l'angle de la section principale de l'analyseur N avec le plan de la figure, nous avons pour les intensités des rayons sortant de l'analyseur et provenant :

Du faisceau Σ $\quad B\frac{I}{d^2}\cos^2\alpha.$

— Σ' $\quad A\frac{I}{d^2}\sin^2\alpha.$

— Σ_1 $\quad B\frac{I_1^2}{d_1^2}\cos^2\alpha.$

— Σ'_1 $\quad A\frac{I_1}{d_1^2}\sin^2\alpha.$

L'écran F étant poussé de manière à intercepter le faisceau Σ'_1 lorsque les deux portions du champ de l'instrument sont également éclairées, on a :

$$B\frac{I}{d^2}\cos^2\alpha = A\frac{I}{d^2}\sin^2\alpha + B\frac{I_1}{d_1^2}\cos^2\alpha.$$

Si c'est l'écran E qui est poussé de manière à intercepter le faisceau Σ', l'écran F étant retiré, on a, lorsque le champ est uniformément éclairé :

$$B\frac{I}{d^2}\cos^2\alpha' + A\frac{I}{d_1^2}\sin^2\alpha' = B\frac{I_1}{d_1^2}\cos^2\alpha',$$

α' correspondant à la nouvelle position de l'analyseur. En éliminant A et B entre les deux relations précédentes, on a une équation qui donne le rapport des intensités.

D'après ce qui précède, la comparaison des intensités de deux sources nécessite deux expériences; mais le rapport $\frac{A}{B} = k$ est une constante de l'instrument; il peut être déterminé une fois pour toutes. Lorsqu'il est connu, le rapport des intensités se déduit d'une seule expérience par la formule

$$\frac{I}{I_1} = \frac{d^2}{d_1^2}\frac{1}{1 - k\,\mathrm{tang}^2\alpha}.$$

Quant à l'appareil, M. Krüss à Hambourg, qui en est le constructeur, lui a donné une forme pratique permettant de l'adapter directement sur le banc photométrique à la place du dispositif de Bunsen (fig. 34).

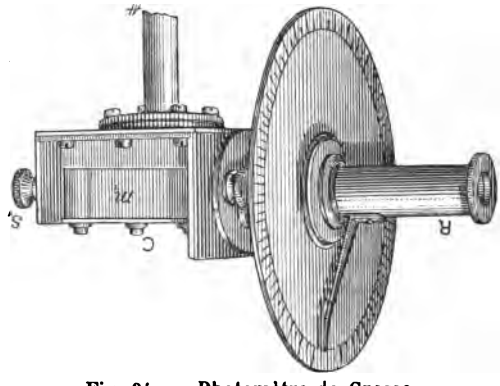


Fig. 34. — Photomètre de Grosse.

Le prisme rectangulaire fendu P, le prisme triangulaire A, tous deux en spath calcaire, et les trois prismes à réflexion totale B, C, D sont placés dans une boîte close C; les parois latérales de cette boîte sont formées par les deux lames de verre mat G_1 et H_2 (en m_1, m_2). Sur la paroi de derrière de la boîte C se trouvent deux boutons S_1 et S_2 qui guident les écrans E et F. La paroi de devant est percée d'un trou circulaire à travers lequel les rayons lumineux passent pour tomber ensuite sur le nicol N placé dans le tube R. Le nicol est mobile autour de l'axe du tube, et un index Z indique les rotations sur le cercle divisé K. Lorsque l'index du nicol est sur le zéro de la division, il faut que l'un ou

l'autre des rayons ordinaire et extraordinaire soit éteint ; des vis de réglage permettent d'obtenir exactement ce résultat.

Ce photomètre peut être employé de diverses manières, soit comme photomètre ordinaire sans compensation, en poussant les deux écrans E, F, à fond, soit comme photomètre à compensation unilatérale, en relevant l'un des écrans seulement, ou enfin comme photomètre à compensation bilatérale en relevant les deux écrans (1).

M. Grosse a perfectionné son appareil (2) en y ajoutant, entre le prisme de spath et l'analyseur N, une lame de quartz à deux rotations, de Soleil, ce qui introduit les phénomènes de coloration par polarisation. La mesure consiste alors à amener l'égalité des teintes des deux plages par le déplacement des lumières à comparer. Nous ne pouvons pas entrer dans le détail de cette modification.

D. — Photomètres basés sur l'acuité visuelle (photométrie hétérochrome).

Méthodes générales de la photométrie hétérochrome.

49. Dans tout ce qui précède, on a supposé implicitement que les deux sources de lumière dont on compare les intensités ont la même teinte, c'est-à-dire que les lumières émises par les deux foyers ont la même composition. Or ce n'est pas le cas, en réalité. Le foyer lumineux choisi comme étalon photométrique émet généralement de la lumière dont la composition diffère de celle de la lumière émise par le foyer qu'on étudie. Il en résulte que les deux plages du photomètre dont il s'agit d'égaliser les éclairements sont diversement colorées, ce qui rend les mesures très incertaines, pour ne pas dire impossibles. Il est en effet difficile de juger exactement de l'égalité d'éclairement de deux surfaces de teintes différentes ; on y parvient cependant dans la pratique, mais d'une manière très approximative et toute conventionnelle, car les impressions sont de natures différentes et le même observateur, à quelques minutes d'intervalle par exemple, ne juge pas de la même manière ; à plus forte raison deux observateurs obtiennent-ils des résultats différents ou même contradictoires. Il faut ajouter en outre que l'illusion optique, par suite de laquelle la ligne de séparation des deux plages éclairées de certains photomètres disparaît au moment de l'égalité, n'existe plus, ce qui enlève à ces photomètres une grande partie de leur exactitude (écrans Foucault, Joly et Elster, Lummer, etc.).

C'est pourquoi M. de Helmholz a pu dire que « de toutes les comparaisons effectuées à l'aide de l'œil entre les intensités de différentes sortes

(1) *Lumière électrique*, 1889, vol. XXXI, p. 224.
(2) *Chemiker Zeitung*, 1887, n° 94.

de lumières composées, il n'en est aucune qui possède une valeur objective, indépendante de la nature de l'œil ».

Heureusement que cette assertion n'est pas rigoureusement vraie, car les mesures d'intensité relative seraient alors à peu près impossibles dans le plus grand nombre de cas, puisqu'il est rare de trouver deux sources de lumière exactement de même teinte.

Les obstacles qui s'opposent à la comparaison exacte de deux sources de lumière de teintes différentes résultent d'une propriété singulière de l'œil découverte par Purkinje (1) et que M. Helmholz (2) énonce ainsi : « *L'intensité de la sensation est une fonction de l'intensité lumineuse qui diffère suivant l'espèce de lumière* ». L'intensité de la sensation croît et décroît plus lentement pour le bleu que pour le rouge pour une même variation de l'intensité lumineuse objective.

Pour préciser, considérons deux sources de lumière colorées, l'une en jaune, l'autre en bleu, et disposons-les devant un photomètre de Rumford (§ 18) de telle sorte que les deux ombres de la tige opaque, placée devant l'écran blanc, paraissent également éclairées. Si nous doublons simultanément la quantité de lumière envoyée sur l'écran par l'une et l'autre source, nous constaterons que l'ombre jaune paraîtra plus éclairée que l'ombre bleue, tandis que si nous réduisons à la moitié de leur valeur primitive les quantités de lumière envoyées par l'une et l'autre source, l'ombre bleue paraîtra plus éclairée que l'ombre jaune. Par conséquent, si l'on veut exprimer l'intensité de la source bleue en fonction de celle de la source jaune prise pour unité, on trouvera un nombre variable suivant les conditions de la comparaison.

Le nombre qui devrait représenter l'intensité de la source bleue sera trouvé d'autant plus faible que l'on aura employé pour effectuer la mesure une quantité de lumière jaune plus considérable, et sera par contre d'autant plus fort que cette quantité de lumière jaune aura été choisie plus faible.

De ce qui précède, il résulte que, si l'on compare une lumière rougeâtre comme celle de la lampe Carcel avec une lumière bleuâtre comme celle d'une lampe à arc, le rapport des intensités varie avec l'éclairement du champ photométrique. Dans le seul cas où les intensités d'éclairement des deux moitiés sont toutes les deux voisines de zéro, le photomètre donne des rapports d'intensité indépendants de leur valeur absolue.

Comme l'a montré M. Crova, cette remarque explique pourquoi M. Allard a pu déterminer avec assez d'exactitude le rapport des intensités lumineuses de sources de teintes très différentes, en prenant la précaution de cligner de l'œil en regardant l'écran photométrique ; en opérant

(1) *Zur Physiologie der Sinne*, vol. II, p. 109.
(2) *Optique physiologique*, p. 421 (de la traduction).

ainsi, le rapprochement des paupières diaphragme de plus en plus l'ouverture pupillaire, et l'intensité du champ rétinien tend vers zéro, limite dans le voisinage de laquelle toute sensation de couleur disparaît, l'impression lumineuse étant encore suffisante pour que l'on puisse juger de l'égalité des deux plages qui paraissent alors d'un gris uniforme.

Les faits qui précèdent montrent que la comparaison des intensités lumineuses de sources diversement colorées doit s'appuyer sur d'autres méthodes que celles qui sont en usage dans les comparaisons photométriques des lumières de même couleur. Avant d'exposer ces méthodes rappelons que, de la manière la plus générale, deux quantités de lumière sont égales entre elles lorsque, reçues par l'œil du même observateur, elles produisent sur lui le même effet, mais il faut que cet effet soit indépendant de la coloration de la lumière et ne dépende que de son intensité.

On peut satisfaire à ces deux conditions de deux manières, comme MM. Macé de Lépinay et Nicati (1) l'ont démontré, en prenant pour point de départ deux fonctions de l'œil bien différentes qui correspondent assez exactement aux deux expressions *distinguer* et *voir*.

50. La première méthode est basée sur le phénomène suivant.

Si l'on fait tomber sur une page imprimée de la lumière de couleur quelconque et d'intensité de plus en plus faible, on éprouve pour la lire une difficulté croissante, et l'observateur, pour distinguer les caractères, doit se rapprocher de plus en plus de l'objet. C'est ce qu'on exprime en disant que l'*acuité visuelle diminue avec l'intensité de l'éclairage*. Rappelons que l'acuité visuelle est mesurée par l'inverse de l'angle sous lequel on doit voir un objet déterminé (ordinairement des caractères d'imprimerie) pour en reconnaître la forme.

Ce fait est intimement lié à l'intensité de l'éclairage, ou plus exactement à l'intensité de la lumière perçue par l'œil, et de plus il est complètement *indépendant de la nature de l'impression colorée produite sur l'œil par la lumière éclairante*.

On peut donc baser une méthode photométrique en considérant *deux quantités de lumière comme égales entre elles lorsque, éclairant un même objet incolore* (c'est-à-dire noir sur fond blanc), *placé toujours à la même distance de l'observateur, elles lui en font percevoir les détails avec la même netteté*, ou, en d'autres termes, *lorsqu'elles ramènent l'acuité visuelle à la même valeur*.

Cette méthode a été imaginée par Celsius et employée plus tard par W. Herschell.

On sait que l'acuité visuelle se mesure en présentant à l'œil placé à une distance invariable (5 mètres, par exemple) des lettres de diverses

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 5e série, vol. XXIV, p. 289; vol. XXX, p. 145.

grandeurs et en notant les dimensions de la première lettre qui est perçue nettement. Une autre méthode plus précise consiste à employer des signes de grandeurs déterminées et à faire approcher l'observateur jusqu'à ce qu'il commence à les distinguer. L'acuité visuelle est, dans ce cas, directement proportionnelle à la distance de l'observateur à l'objet au moment où il le perçoit distinctement.

Les lettres que l'on emploie sont constituées par des traits noirs épais dont l'épaisseur est égale à leur intervalle. On prend comme unité d'acuité visuelle ($v=1$), une acuité telle que l'observateur voie la distance de deux traits consécutifs sous l'angle de 1'. Dans le cas où l'épaisseur des traits est de 1 millimètre, l'acuité visuelle est 1 lorsque la distance de l'observateur est de 3,44 mètres. A une distance de 1 mètre, l'acuité visuelle est $v_1=\frac{1}{3,44}=0,29$ et à n mètres, elle est de $v_n=0,29\,n$.

Macé de Lépinay et Nicati ont trouvé qu'il était préférable, pour les mesures photométriques, de remplacer les lettres par trois traits noirs horizontaux sur fond blanc, de 5 millimètres de long sur 1 millimètre de large et distants de 1 millimètre. Pour obtenir des traits parfaitement noirs, le plus simple est de les découper dans une feuille de papier blanchi à la céruse, et de placer la feuille devant une cavité recouverte de velours noir. De cette manière les traits noirs ne réfléchissent qu'une partie négligeable de la lumière qui les frappe.

Pour comparer d'après cette méthode les intensités de deux sources lumineuses, voici comment on peut procéder.

On éclaire les signes conventionnels adoptés pour constater l'acuité visuelle avec la lumière de l'étalon photométrique placé à une distance déterminée d, puis l'observateur se déplace jusqu'au moment où l'œil, arrivé à la distance d_1, perçoit nettement les signes conventionnels. Ensuite on les éclaire avec le foyer à étudier qu'on déplace jusqu'à ce que l'observateur perçoive de nouveau les signes conventionnels avec la même facilité que précédemment; soit d_2 la distance du foyer correspondant à la perception limite.

A ce moment les acuités visuelles sont égales et par conséquent les éclairements sont égaux. I_1 étant l'intensité de l'étalon photométrique, I_2 celle du foyer qu'on étudie, on a :

$$\frac{I_1}{d_1^2}=\frac{I_2}{d_2^2}$$

d'où

$$I_2=I_1\frac{d_2^2}{d_1^2}.$$

Dans la pratique, on peut employer avec avantage comme signes conventionnels les logarithmes d'une table quelconque; la page détachée de la table joue le rôle d'écran sur lequel les nombres apparaissent avec

une plus ou moins grande netteté, suivant l'intensité d'éclairement.

Cette méthode ne doit être employée que lorsque les deux sources lumineuses à comparer sont très diversement colorées, car la précision qu'elle comporte ne dépasse pas 10 p. 100 environ; ce degré de précision peut être considéré comme satisfaisant pour des foyers diversement colorés; mais il ne saurait être suffisant pour des lumières de mêmes teintes.

51. Outre la méthode précédente basée sur l'acuité visuelle, celle dans laquelle on constate directement l'égalité d'éclairement de deux plages continues peut aussi être utilisée pour la comparaison de sources lumineuses de teintes différentes, mais avec une restriction importante. En éclairant deux plages voisines, l'une exclusivement par l'une des sources, l'autre exclusivement par l'autre source, *l'expérience démontre que quelque différentes que soient les colorations de ces deux plages contiguës, pourvu qu'elles soient assez petites, l'œil peut apprécier avec une certaine exactitude le moment où ces deux plages paraissent également éclairées.*

La restriction mentionnée plus haut est relative aux dimensions des plages dont il s'agit d'établir l'égalité de clarté. L'œil apprécie en effet d'autant plus difficilement la coloration d'une surface, que cette surface est plus petite. Il résulte des mesures très complètes de MM. Macé de Lépinay et Nicati que les deux plages éclairées par les sources que l'on compare doivent être vues sous un angle inférieur à 45′. Par conséquent il ne faut pas que la largeur des plages soit supérieure à $6^{mm},5$ si l'observateur est placé à $0^{m},50$ de distance. Voici les valeurs limites de la largeur des plages pour diverses distances de l'observateur :

Distance.	Largeur.
$0^{m},1$	$1^{mm},3$
0 ,3	3 ,9
0 ,5	6 ,5
1 ,0	14 ,1
2 ,0	26 ,2
3 ,0	39 ,2
5 ,0	65 ,5

La valeur limite que la largeur de la plage éclairée ne doit pas dépasser pour une distance donnée de l'observateur est déterminée de manière que le rapport des intensités des deux sources de teintes différentes soit indépendant de leur intensité absolue ou du moins ne dépende plus que du phénomène de Purkinje; pour cela il faut que les images rétiniennes soient plus petites que 0,002 millimètres, ce qui correspond à un angle visuel de 45′; cette valeur est exactement de 0,002 millimètre pour le bleu et de 0,004 millimètre pour le rouge. Dans la plupart des lumières usuelles, les radiations les plus réfrangibles sont peu intenses; on peut presque toujours doubler les valeurs des largeurs limites, ce qui revient à donner à l'angle visuel une valeur de 1° 30′.

Cette méthode consiste donc à employer, pour la comparaison des

sources lumineuses diversement colorées, les photomètres usuels en ayant soin que la largeur des plages dont il faut égaliser les éclairements ne dépasse pas les limites ci-dessus.

Ce qui précède suffit à donner une idée des deux méthodes principales qui peuvent servir à la comparaison des lumières de colorations différentes. Il nous reste à entrer dans le détail des méthodes et des appareils pratiques.

Méthode de M. Macé de Lépinay (1).

52. Cette méthode repose sur le fait suivant démontré par l'expérience et qui a servi à M. Crova pour établir sa méthode de mesure optique des hautes températures.

Quand des corps de même température et de pouvoirs émissifs différents sont placés dans une enceinte obscure, ils émettent des lumières d'intensités très différentes mais de même composition.

Cette loi est directement applicable aux sources lumineuses usuelles qui toutes sont constituées par des particules de charbon rendues incandescentes par la haute température à laquelle elles sont portées.

Soit I l'intensité d'un foyer lumineux, déduite de sa comparaison directe avec l'étalon photométrique, la lampe Carcel, par exemple. Désignons par R l'intensité, mesurée au spectrophotomètre, de l'une de ses radiations rouges, de longueur d'onde déterminée, rapportée à celle de la radiation de même espèce de l'étalon Carcel, et par V l'intensité, définie de la même manière, de l'une de ses radiations vertes. Si l'on substitue au premier luminaire un autre de même température, les trois quantités I, V et R restent proportionnelles, et les deux rapports $\frac{I}{R}$ et $\frac{V}{R}$ conservent les mêmes valeurs.

Si la température de la source étudiée varie d'une manière continue, il en sera de même de la composition de la lumière qu'elle émet, et les deux rapports $\frac{I}{R}$ et $\frac{V}{R}$ varieront aussi d'une manière continue. On est donc en droit de poser :

$$\frac{I}{R} = f\left(\frac{V}{R}\right).$$

On pourrait donc déterminer l'intensité d'une source usuelle quelconque en mesurant simplement les intensités V et R si l'on connaissait au préalable la nature de la fonction $f\left(\frac{V}{R}\right)$.

(1) *Comptes rendus*, vol. XCVII, p. 1428.

Cette solution du problème ne serait pas pratique, car elle nécessiterait l'emploi, toujours délicat, d'un spectrophotomètre. Mais l'exactitude du raisonnement subsiste entièrement si l'on substitue aux mesures spectrophotométriques effectuées avec des radiations de longueur d'onde déterminées, dans le rouge et dans le vert, des mesures effectuées au moyen du photomètre Foucault. Il faut alors observer les plages au travers de deux dissolutions, l'une rouge, l'autre verte; ces dissolutions doivent toujours être employées dans le même état de concentration et sous la même épaisseur, elles doivent en outre fournir des radiations sensiblement simples, afin que les deux plages de l'écran aient la même coloration.

Les dissolutions qui remplissent le mieux les conditions énoncées ci-dessus sont : une dissolution de perchlorure de fer pur dans l'eau à 38°B., et une dissolution de chlorure de nickel pur dans l'eau, à 18°B. Les deux dissolutions doivent avoir une épaisseur de 3 millimètres, la première ne laisse passer que les radiations rouges, la seconde que les radiations vertes.

En vue de déterminer par l'expérience la fonction $f\left(\frac{V}{R}\right)$, M. Macé de Lépinay a effectué 52 mesures, en comparant successivement à l'étalon Carcel une lampe modérateur à cheminée droite, une lampe modérateur à cheminée coudée, une lampe à pétrole, la lumière Drummond, et enfin la lumière solaire, diffusée par un écran blanchi au sulfate de baryte.

La formule suivante résume l'ensemble de toutes ces mesures :

$$\frac{R}{I} = 1 + 0{,}208\left(1 - \frac{V}{R}\right).$$

C'est au moyen de cette formule qu'a été calculé le tableau numérique suivant, qui suffit pour les applications :

$\frac{V}{R}$	$\frac{I}{R}$	$\frac{V}{R}$	$\frac{I}{R}$
0,8	0,96	2,0	1,26
1,0	1,00	2,2	1,33
1,2	1,04	2,4	1,41
1,4	1,09	2,6	1,50
1,6	1,14	2,8	1,60
1,8	1,20		

Le degré d'exactitude que comporte cette méthode est donné par les deux vérifications suivantes.

Avec une lampe Swan (de 12 volts et 0,95 amp.) M. Macé de Lépinay a trouvé :

$$V = 0{,}167$$
$$R = 0{,}184$$

d'où il résulte :

$$\frac{V}{R} = 0{,}908$$
$$\frac{I}{R} = 0{,}98$$

et partant

$$I = 0,180.$$

L'expérience directe a donné :

$$I = 0,182.$$

Avec la lumière Drummond, on a trouvé également :

$$V = 6,59$$
$$R = 5,04$$

d'où

$$\frac{V}{R} = 1,31$$
$$\frac{I}{R} = 1,07$$

c'est-à-dire

$$I = 5,39.$$

La mesure directe a donné :

$$I = 5,43.$$

Photomètre de L. Weber.

53. On peut mettre la formule précédente de M. Macé de Lépinay sous la forme

$$I = KR$$

en représentant par I l'intensité de la source définie par la méthode d'égal éclairement, R l'intensité de la lumière rouge obtenue au moyen d'une dissolution de perchlorure de fer dans l'eau à 38° Beaumé, et K un coefficient qui tient compte des éléments physiologiques du problème et qui a pour expression, d'après les mesures de M. Macé de Lépinay :

$$K = \frac{1}{1 + 0,208\left(1 - \frac{V}{R}\right)}.$$

Dans cette dernière formule, V représente l'intensité de la lumière verte provenant du passage des rayons lumineux à travers une dissolution de chlorure de nickel pur à 18°B.

Le photomètre de M. Weber permet de mesurer facilement les intensités V et R à l'aide desquelles l'intensité I se déduit de la formule précédente (1).

Il se compose d'un tube horizontal A (fig. 35) dans lequel sont placés l'étalon photométrique G et un verre dépoli *s* dont les mouvements parallèles à l'axe de A sont commandés par la vis *f* et peuvent être mesurés avec une exactitude très grande. A l'une des extrémités de A, et mobile autour de l'axe de ce tube, se trouve un deuxième tube B également pourvu d'un verre dépoli s_1 ; il est muni en *g* d'une ouverture devant

(1) *Elektrotechnische Zeitschrift*, vol. V, p. 166. — *Lum. él.*, vol. XII, p. 468.

laquelle se place l'œil de l'observateur. Lorsqu'on dirige le tube B sur un foyer lumineux quelconque, l'arête verticale de gauche du prisme à réflexion totale P (fig. 36) partage en deux portions le champ visuel; la moitié de gauche se trouve éclairée par le foyer observé et la moitié de droite par l'étalon de comparaison G. En déplaçant de droite à gauche le verre s et en renforçant au besoin le verre s_1, on arrive à obtenir une parfaite égalité dans l'éclairement des deux moitiés du champ visuel. Il suffit, dans ces conditions, de placer devant l'œil une plaque de verre rendu rouge, grâce à un dépôt de sous-oxyde de cuivre, pour que les deux

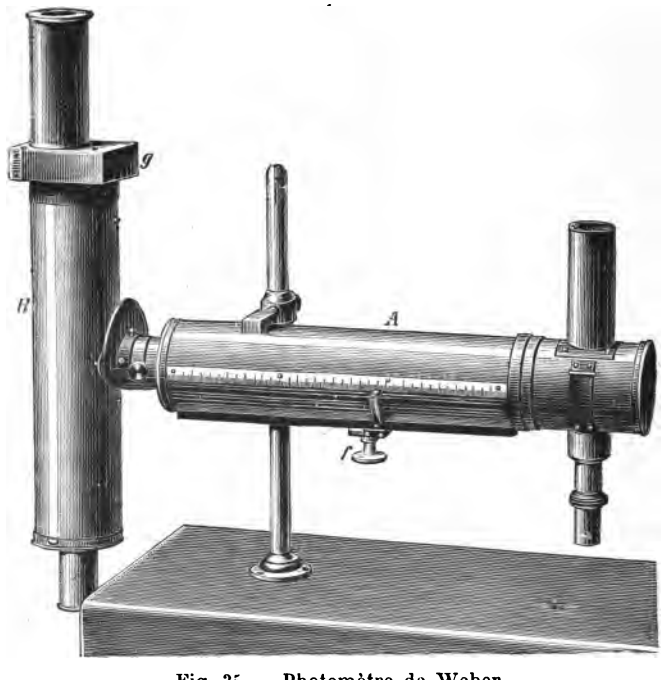


Fig. 35. — Photomètre de Weber.

champs visuels paraissent absolument monochromes même lorsque les teintes des sources de lumière que l'on compare diffèrent notablement l'une de l'autre.

M. Weber ne s'est pas contenté des valeurs du coefficient K déduit de la formule de Macé de Lépinay; il a déterminé directement ce coefficient à l'aide de son appareil et de deux plaques de verre dépoli sur lesquelles sont photographiés des dessins particuliers. Ces deux plaques sont d'ailleurs jointes à chaque appareil, ce qui permet de vérifier par la méthode des acuités visuelles égales les résultats obtenus par la méthode des éclairements égaux.

Ces deux plaques sont obtenues de la manière suivante : on dessine d'abord sur un rectangle de papier de $0^m,40$ sur $0^m,20$ huit carrés dans lesquels on trace des cercles concentriques tels que la largeur du blanc de chaque cercle se trouve égale à la largeur du noir. Une réduction photographique au vingtième donne des plaques très nettes de $0^m,2$ sur $0^m,1$ dans lesquelles l'épaisseur des huit systèmes de cercles varie de $0^{mm},275$ à $0^{mm},10$ par degrés $0^{mm},025$.

Ces plaques sont placées, l'une en s, l'autre en s_1 ; elles ne remplissent chacune que le tiers de la moitié correspondante du champ visuel. La plaque s_1 étant fixe, la plaque s doit être sur la division $0^m,245$ pour que les dessins des deux plaques soient vus sous le même angle par l'observateur.

Si les deux portions du champ visuel sont également éclairées par des sources de lumière de même couleur, la netteté des dessins est la même de part et d'autre; mais si l'on vient à diriger le tube B sur une source dont la teinte diffère de celle de l'autre et que l'on établisse ensuite l'égal éclairement des deux surfaces, les dessins ne seront plus également nets dans les deux moitiés du champ visuel. Le phénomène tient à ce fait, énoncé par M. Macé de Lépinay, que dans le spectre, à partir du vert, les couleurs réfrangibles contribuent peu à la netteté de la perception, tout en contribuant encore dans une assez forte mesure à l'éclairement des surfaces.

Il faut donc faire deux observations. Les plaques étant mises en place, on dirige B sur une source de lumière quelconque, puis on recule ou on avance le photomètre jusqu'au moment où les deux plaques présentent des dessins d'une égale netteté.

Ce point se détermine d'une façon précise et indépendante de la vue de l'observateur, en fixant pendant le même temps les deux dessins et en promenant son regard des cercles les plus gros aux cercles les plus fins. Il arrive alors que pour un carré d'un certain ordre les blancs ne peuvent plus être distingués des noirs : on est au point lorsque, dans les deux plaques, le carré pour lequel cette distinction devient impossible porte le même numéro d'ordre. A ce moment, on met devant l'œil le verre rouge, et sans plus s'occuper des dessins, on amène l'égal éclairement des surfaces qui sont en dehors des plaques photographiques, en déplaçant le verre s. Supposons que l'on soit amené à écarter s de r centimètres à partir de O. La valeur de K aura évidemment pour expression :

$$K = \frac{r^2}{24,5^2}.$$

Cette valeur de K n'est pas absolument indépendante de l'intensité de l'éclairage qui a servi à établir l'égale netteté des dessins; aussi faut-il maintenir la flamme de l'étalon à une hauteur aussi invariable que possible.

Pour des sources lumineuses qui renferment, relativement à la lampe à acétate employée comme étalon, plus de lumière jaune et moins de lumière rouge, on trouve r plus grand que $0^m,245$. La valeur de K devient égale à 1 lorsque la lumière considérée a la même couleur que la flamme de l'élalon.

M. Weber a entrepris une deuxième série d'expériences, pour déterminer les variations de K avec la couleur de la lumière du foyer lumineux. On amène les surfaces à être également éclairées pour la lumière rouge, s restant fixe au point $0^m,245$, puis l'on substitue un verre vert au verre rouge, et l'on note le nouvel écart ρ de s pour lequel l'égal éclairement des surfaces s'établit de nouveau. On répète ces mesures pour diverses teintes du foyer lumineux obtenues en poussant plus ou moins une lampe à incandescence.

Dans ces conditions, le rapport des intensités V et R du vert et du rouge, comparées aux mêmes couleurs de la lampe à acétate, a pour expression :

$$\frac{V}{R}=\frac{24.5^2}{\rho^2}.$$

Quant aux verres qui sont joints au photomètre de Weber, des recherches spectroscopiques ont montré que le verre rouge ne laisse passer que les rayons compris entre les longueurs d'onde $\lambda = 0,687\,\mu$ et $\lambda = 0,630\,\mu$ dont le maximum d'intensité correspond à $\lambda = 0,656\,\mu$. Pour le verre vert, les rayons se trouvent compris entre $\lambda = 0,577\,\mu$ et $\lambda = 0,516\,\mu$, avec un maximum pour $\lambda = 0,547\,\mu$.

En même temps que M. Weber, le Dr O. Schumann a déterminé à l'aide du spectrophotomètre de Glan (64) la valeur du rapport des radiations verte et rouge de la lumière d'une lampe à incandescence comparé également aux radiations de même couleur d'une lampe à acétate d amyle; les longueurs d'ondes des radiations comparées étaient $\lambda = 0,676,2\,\mu$ et $\lambda = 0,557,4\,\mu$.

Ces valeurs s'écartant peu les unes des autres, M. Weber a construit des courbes qui lui ont donné les valeurs moyennes de K renfermées dans le tableau suivant :

$\frac{V}{R}$.	K.	$\frac{V}{R}$.	K.
0.3	0.50	1.3	1.22
0.4	0.56	1.4	1.28
0.5	0.64	1.5	1.34
0.6	0.72	1.6	1.40
0.7	0.80	1.7	1.46
0.8	0.87	1.8	1.51
0.9	0.94	1.9	1.56
1.0	1.00	2.0	1.61
1.1	1.08	2.1	1.65
1.2	1.15	2 2	1.69

Ce tableau est joint à chaque appareil. Les mesures pratiques n'offrent alors aucune difficulté.

On fait les deux pointés d_r et d_v correspondant à l'égalité d'éclairement des deux plages du photomètre pour les radiations rouges et vertes obtenues en insérant successivement dans le tube mobile les plaques de verre rouge et vert. On a alors $\frac{V}{R} = \frac{d_r^2}{d_v^2}$ et, en cherchant dans le tableau ci-dessus la valeur correspondante de K, on obtient :

$$I = \alpha KR,$$

α étant un facteur qui dépend du coefficient d'absorption des plaques dépolies du photomètre et de l'intensité de la flamme étalon. Il est facile de déterminer cette constante α une fois pour toutes.

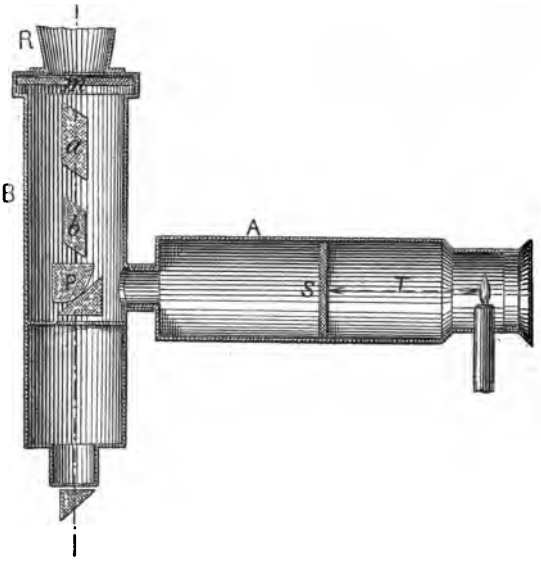


Fig. 36.

Remarquons que les valeurs de K tirées du tableau précédent ne donnent des résultats précis que pour les comparaisons photométriques des foyers dont la lumière a une composition analogue à celle qui est émise par les lampes à incandescence en régime normal.

Si les foyers que l'on compare émettent de la lumière de même teinte, on a $K = 1$. On peut alors faire la comparaison sans employer les verres colorés ; si l'on veut en faire usage, il suffit de faire une observation avec l'un d'eux seulement, le rapport des intensités des radiations rouges ou vertes étant égal au rapport des intensités totales.

54. M. L. Weber a perfectionné récemment (1) son photomètre par l'introduction de l'écran optique de Lummer et Brodhun (§ 30) et par la substitution d'un appareil à polarisation aux écrans destinés à égaliser les éclairements des deux moitiés du champ visuel. Ce nouveau modèle appartient en réalité à la classe des photomètres à polarisation.

(1) *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 1891, p. 7.

La figure 36 montre la disposition de ce nouvel appareil. Le prisme écran de Lummer est mis à la place du prisme à réflexion totale de l'ancien modèle. Dans le tube mobile B se trouvent deux nicols *a* et *b* dont la position relative détermine l'intensité d'éclairement de la partie extérieure du champ photométrique, l'éclairement de la partie intérieure de ce champ est réglée de la manière ordinaire par le déplacement de la plaque opalescente *s*.

On peut employer deux méthodes pour effectuer les comparaisons. Dans la première, on place les nicols dans leur position parallèle ($\alpha = o$, $\beta = \pm 90^\circ$ ou $\alpha = \pm 90^\circ$ $\beta = o$) de manière qu'il n'y ait aucun affaiblissement de la lumière qui les traverse, sauf l'affaiblissement produit par l'absorption. On égalise ensuite les éclairements des deux moitiés du champ en déplaçant la plaque opalescente *s*.

La seconde méthode est préférable. On laisse la plaque *s* dans une position fixe, puis on tourne le nicol *b* jusqu'à ce que les deux moitiés du champ visuel soient également éclairées. L'affaiblissement réalisé se calcule facilement à l'aide de la formule de Malus, l'intensité du champ extérieur étant donné par la formule $\frac{c}{d^2} \sin^2 (\alpha\text{-}\beta)$. Dans cette formule c représente la constante du nicol, d la distance fixe de la plaque opalescente. On peut aussi déterminer empiriquement l'affaiblissement correspondant à une position déterminée du nicol *b* et établir à l'avance une table pour chaque appareil. Cette seconde méthode rend inutile la division du tube fixe A.

Le tube extérieur R sert à empêcher l'accès de la lumière latérale sur la plaque nue lorsqu'il s'agit de faire des mesures d'éclairement.

Les deux nicols *a* et *b* sont placés entre la plaque *s'* et le prisme P, car si l'un d'eux, *b* par exemple, était placé entre le prisme écran et le prisme oculaire, il en résulterait des complications dans les formules. Une partie de la lumière réfléchie par la partie extérieure de l'écran et provenant de A est polarisée par réflexion ; il faudrait alors tenir compte de ce fait dans les formules. Le tube B est muni d'un prisme oculaire à réflexion totale afin de faciliter les observations lorsqu'il est en position verticale.

Méthode de M. Crova.

55. Tandis que la méthode imaginée par M. Macé de Lépinay ramène la comparaison photométrique de deux lumières de teintes quelconques à la comparaison des intensités de deux radiations déterminées, M. Crova (1) a imaginé une méthode qui n'exige que la comparaison des intensités

(1) *Comptes rendus*, vol. XCXIII, p. 512. — *Ann. de chim. et de phys.*, 6e série, vol. VI, p. 528. — *Lum. él.*, vol. XVIII, p. 549.

d'une seule radiation. Cette méthode repose sur un fait, vérifié par un grand nombre d'expériences. Il peut s'énoncer comme suit : *Si l'on compare deux lumières de teintes très différentes, les intensités totales sont entre elles dans le même rapport que les intensités mesurées dans la région du spectre dont la longueur d'onde est de* 0,582 μ.

Voici comment M. Crova est arrivé à cette conclusion. Il a mesuré à l'aide du spectrophotomètre l'intensité lumineuse des diverses régions du spectre de la lumière solaire et de la lumière de la lampe Carcel en prenant dans chaque série, comme unité, la centième partie de l'intensité de la radiation la plus intense.

En traçant les deux courbes dont les abcisses sont les longueurs d'onde et les ordonnées les pouvoirs éclairants, l'aire de chacune d'elles représente, pour chaque lumière, le pouvoir éclairant total. M. Crova a déterminé avec soin le rapport des aires des deux courbes fournies par la lumière solaire et la lampe Carcel et il a obtenu la fraction 0,7302. Si l'on divise les ordonnées de la courbe des intensités de la lumière solaire par 0,7302, tout en conservant la courbe de la lampe Carcel, les deux aires sont alors égales, et les courbes correspondent à des éclairements égaux. Ces deux courbes se coupent en un point dont l'abscisse correspond à $\lambda = 0,582$ μ; cette radiation est donc celle dont l'intensité est la même dans les deux lumières quand les deux pouvoirs éclairants sont égaux.

Les comparaisons qui précèdent ayant été faites avec la lumière d'un foyer à basse température comme la lampe Carcel dont le maximum d'éclairement est à la radiation $\lambda = 0,592$ μ et avec la lumière solaire, qui a la température d'émission la plus haute et dont le maximum est à $\lambda = 0,564$ μ, les conclusions qui précèdent peuvent s'appliquer directement aux foyers lumineux usuels, dont les températures d'émission sont comprises entre ces limites.

Cette méthode ne peut pas s'appliquer à l'étude photométrique d'un foyer dont la température d'émission varie avec l'intensité lumineuse ; les lampes à incandescence sont dans ce cas. L'intensité lumineuse augmente avec l'énergie dépensée dans la lampe, mais la proportion des radiations de diverses longueurs d'onde varie également. La méthode de Weber dans laquelle on mesure aussi l'intensité lumineuse pour une seule longueur d'onde est affranchie de cette restriction parce que le coefficient K est déterminé expérimentalement pour différents degrés d'incandescence.

Pour réaliser rigoureusement une comparaison d'après la méthode de M. Crova, il faut se servir d'un spectrophotomètre et amener le milieu de la fente oculaire sur le point de la graduation qui correspond à $\lambda = 0,582$ μ. Mais, dans la pratique, on peut opérer d'une manière plus simple et plus rapide à l'aide de l'une des deux méthodes suivantes.

Dans la première, on emploie l'écran ordinaire de Foucault ou un écran quelconque qu'on observe à l'aide d'une lunette dont l'objectif à court foyer permet d'obtenir une image très nette du disque et de la ligne de séparation des deux plages.

Dans le corps de la lunette se trouve un système de deux nicols placés à angle droit, entre lesquels il y a une lame de quartz perpendiculaire à l'axe et de 9 millimètres d'épaisseur; cette épaisseur a été calculée de manière que son interposition entre les deux nicols croisés donne naissance dans le spectre de la lumière qui les traverse à deux larges bandes d'interférence situées dans les deux extrémités du spectre et qui en éteignent presque complètement l'intensité dans ces régions. En allant de ces deux bandes vers la limite du jaune et du vert, où se trouve la radiation 0,582, l'intensité des radiations transmises varie proportionnellement au carré du cosinus de l'angle que fait la section droite du second nicol avec les plans de polarisation des diverses radiations qui ont subi, dans la lame de quartz, la dispersion rotatoire; la radiation pour laquelle ce cosinus est égal à l'unité ne subit aucun affaiblissement.

L'appareil est réglé pour que ce soient précisément les radiations voisines de 0,582 μ qui ne subissent aucun affaiblissement.

Dans la seconde méthode, qui est beaucoup plus simple, on observe l'écran photométrique au travers d'une solution spéciale qui ne laisse passer que les radiations lumineuses dont la longueur d'onde est voisine de 0,582 μ. Cette solution produisant une absorption assez considérable est plus spécialement applicable aux foyers lumineux très intenses.

La solution se prépare de la manière suivante :

Perchlorure de fer anhydre sublimé.....	22gr,321
Chlorure de nickel cristallisé.....	27 ,191

Il faut dissoudre dans l'eau distillée, et amener le volume de la solution à 100 centimètres cubes à la température de 15°.

Le liquide est renfermé dans une cuve en glaces à faces parallèles, bouchée à l'émeri. Les cuves dont M. Crova se sert sont formées d'un anneau plat en verre dressé, de 7 millimètres d'épaisseur, contre les deux faces duquel sont fixées, par simple adhérence, au moyen d'une goutte d'eau distillée, deux glaces minces, à faces bien parallèles, et serrées ensuite contre l'anneau, au moyen de deux plaques en laiton noirci, munies de quatre vis de pression; ces deux plaques portent deux orifices circulaires dont le diamètre est un peu inférieur à celui de la cuve, de manière à ne laisser passer que les rayons qui ont traversé le liquide.

Le liquide est introduit au moyen d'une pipette capillaire par un petit orifice percé dans l'épaisseur de l'anneau, et fermé ensuite par un bou-

chon à l'émeri. Pour éviter la rupture possible des glaces, par suite d'une trop forte pression des vis, il est bon d'interposer entre la cuve et les plaques de laiton deux rondelles de carton ou de cuir. Des cuves ainsi remplies se conservent très longtemps sans altération.

Sous une épaisseur de 7 millimètres cette solution ne laisse passer que les radiations comprises entre les longueurs d'onde 0,630 μ et 0,534 μ avec un maximum vers 0,580 μ ; si l'on augmente l'épaisseur, ces limites se rapprochent et tendent vers un maximum de 0,580 μ à 0,582 μ, qui est le plus favorable.

La température exerce une action notable sur le pouvoir absorbant du perchlorure de fer ; à mesure qu'elle s'élève, l'absorption va en croissant dans la région la plus réfrangible et l'écran noir qui paraissait recouvrir le spectre jusqu'à la limite du vert s'avance vers le rouge. Les limites de longueur d'onde indiquées plus haut sont donc variables avec la température, mais dans les environs de 13° centigrades; ces limites sont sensiblement invariables pour de faibles écarts de température.

Emploi de milieux colorés complémentaires.

56. L'étude de la photométrie hétérochrome serait incomplète si l'on passait sous silence l'emploi des verres colorés à teintes complémentaires, destinés à éliminer les erreurs dues aux différences de teintes des lumières que l'on compare.

M. Tresca a le premier proposé d'intercaler entre les foyers et l'écran des plaques de verre présentant des colorations à peu près inverses. Il a imaginé ce procédé à l'occasion des mesures photométriques des lampes à arc à l'exposition d'électricité de 1881.

On place sur le trajet des rayons rougeâtres de l'étalon (lampe Carcel) un verre vert et sur le trajet des rayons bleuâtres de la lampe à arc un verre rougeâtre. Si les verres colorés qu'on intercale ainsi étaient rigoureusement complémentaires par rapport aux radiations de la source correspondante, tous les rayons se trouveraient interceptés et les deux champs du photomètre resteraient obscurs ; mais comme on emploie des verres ayant une coloration à peu près inverse, on constatera de part et d'autre une teinte mate, grise, dont la tonalité pourra être sensiblement la même des deux côtés.

Mais si les teintes des deux champs du photomètre sont égalisées, on ne voit pas comment on peut tenir compte des quantités de lumière absorbées, de part et d'autre. par les deux verres colorés. M. Tresca semble admettre à priori que les pertes sont équivalentes, c'est-à-dire qu'il se perd autant de rayons rouges par la plaque verte que de rayons verts par la plaque rouge, ce qui n'est rien moins que prouvé. Si l'on voulait apprécier expérimentalement la valeur de toutes ces pertes, on serait

de nouveau conduit à comparer les intensités relatives des deux lumières très diversément colorées, et c'est justement là ce qu'on cherche à éviter. Le procédé de M. Tresca manque donc d'une base scientifique précise.

Une seconde méthode basée sur l'emploi de verres complémentaires a été aussi proposée quelquefois. Elle consiste à faire deux mesures en observant l'écran successivement au travers de deux verres ou de deux milieux spéciaux qui ne laissent passer que les rayons lumineux exactement complémentaires. La moyenne arithmétique des résultats des deux mesures est alors considérée comme le résultat exact.

Cette méthode ne peut pas donner des résultats exacts, car elle ne représente qu'une grossière approximation des méthodes scientifiques de Macé de Lépinay et de Weber. On peut cependant établir assez facilement les conditions auxquelles doivent satifaire les deux milieux colorés et les lumières qu'on compare pour que le procédé soit rigoureusement exact.

Considérons par exemple deux verres exactement complémentaires, par exemple l'un rouge, l'autre vert. Désignons par I_1 l'intensité du premier luminaire, par V_1 et R_1 cette intensité mesurée au travers du verre rouge et du verre vert. Désignons en outre par I_2, V_2 et R_2 les mêmes éléments du second luminaire. On a évidemment les relations suivantes :

$$I_1 = V_1 + R_1$$
$$I_2 = V_2 + R_2.$$

Désignons par k le rapport des intensités totales :

$$k = \frac{I_2}{I_1}.$$

Si les deux foyers lumineux L_1 et L_2 émettaient de la lumière de même qualité, c'est-à-dire dont les intensités spectrales relatives fussent égales, on aurait :

$$I_2 = kI_1 = kV_1 + kR_1.$$

Mais ce n'est pas le cas, et la relation devient :

$$I_2 = aV_1 + bR_1.$$

Les deux coefficients a et b sont variables avec la qualité des lumières L_1 et L_2. Si l'un est plus petit que k, l'autre doit être plus grand. Posons $a = k - x$, nous aurons :

$$I_2 = kI_1 = (k - x)V_1 + bR_1$$

d'où

$$b = \frac{kI_1 - (k - x)V_1}{R_1}.$$

Pour qu'on puisse envisager la moyenne arithmétique des mesures comme exacte, il faut que $a + b = 2k$, c'est-à-dire que $b = k + x$. Mais on a :

$$b = k + x\frac{kI_1 - (k - x)V_1}{R_1}$$

et en remplaçant $k\,I_1$ par sa valeur :

$$k + x = \frac{kR_1 + kV_1}{R_1}.$$

Pour que cette condition soit satisfaite, il faut que $V_1 = R_1$. Ces deux milieux colorés doivent donc être non seulement complémentaires, mais ils doivent absorber la même quantité de lumière : le faisceau lumineux qui a traversé le premier milieu doit avoir la même intensité qu'après avoir traversé le second. La vérification de cette propriété des milieux colorés est aussi difficile que la comparaison des deux foyers lumineux puisqu'on aura à vérifier l'égalité des deux lumières, l'une couleur rouge jaunâtre, l'autre de couleur vert bleuâtre. La construction de ces deux milieux rigoureusement complémentaires ne serait pas non plus sans offrir de difficultés. Il n'y a donc pas lieu d'insister davantage sur ce procédé.

E. — Photomètres basés sur les actions diverses de la lumière.

57. Tous les appareils dans lesquels on remplace l'action de la lumière sur l'œil par des actions s'exerçant sur des phénomènes physiques ou chimiques indépendants de l'observateur, sont impropres aux mesures photométriques. Ils mesurent l'action de la lumière sur le phénomène qui est à leur base, mais ils ne mesurent en aucune manière son action physiologique. Tels sont les photomètres chimiques qui ont cependant leur importance au point de vue photographique, les photomètres à sélénium, etc.

Bien que ces appareils ne répondent pas à la principale condition des mesures photométriques, il faut néanmoins les mentionner parce qu'eux seuls permettent d'effectuer l'enregistrement automatique des mesures photométriques. Cet enregistrement est en effet impossible avec les appareils photométriques usuels, puisque l'œil est leur principal organe.

Parmi les photomètres de cette catégorie, il faut mentionner principalement le photomètre à sélénium de Siemens et les photomètres de Dessendier et de Lion. Il faut citer encore le bolomètre dont Langley a fait un usage si étendu pour mesurer la répartition de l'énergie dans le spectre et le radiomètre de Crooks dont M. Olivier (1) a construit un modèle spécial pour la photométrie.

Photomètre à sélénium.

58. On sait que la résistance électrique du sélénium diminue sous

(1) *Lumière électrique*, vol. XXVII, p. 560.

l'influence de la lumière; ce sont les radiations lumineuses qui agissent de la manière la plus intense, les radiations calorifiques exerçant un effet beaucoup moins marqué.

C'est sur cette propriété que MM. Siemens et Halske (1) ont imaginé, il y a dix ans environ, leur photomètre à sélénium. Un tube à sélénium remplace l'écran des photomètres ordinaires.

Ce tube à sélénium est placé avec un galvanomètre à miroir dans le circuit d'une pile. On le soumet d'abord aux radiations de l'étalon photométrique et on note la division du galvanomètre, puis on le tourne de manière à l'exposer aux radiations du foyer à étudier. On varie ensuite la distance de la plaque de sélénium au foyer jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre soit égale à celle qui est produite par l'etalon. Dans ce cas les éclairements produits par l'étalon et le luminaire inconnu sont égaux.

M. Gimé (2) a imaginé également une méthode photométrique basée sur l'emploi d'un mince ruban de sélénium, enroulé sur lui-même de manière à former une surface assez large qu'on place dans le circuit d'une pile constante.

Photomètre enregistreur de Dessendier.

59. Il est fondé sur le principe suivant. Si l'on prend un mélange de volumes égaux d'hydrogène et de chlore, et qu'on maintienne ce mélange dans l'obscurité, ces deux gaz ne se combinent pas. Si l'on expose ce mélange il y a combinaison, et par suite formation d'acide chlorhydrique; ce dernier peut être absorbé par une solution chlorée dont le niveau tend à s'élever. Or, la quantité d'acide chlorhydrique produite étant, d'après M. Dessendier, proportionnelle à la quantité de lumière reçue par le mélange gazeux, il suffit d'enregistrer les variations du niveau de la solution chlorée pour enregistrer les variations de la quantité de lumière reçue (3).

Ce photomètre enregistre l'action chimique de la lumière sur un mélange d'hydrogène et de chlore et non son action photométrique ; aussi son emploi est-il tout indiqué en photographie où il a d'ailleurs été appliqué au tirage automatique des épreuves. De là à appliquer cet appareil aux mesures photométriques industrielles, il y a loin. Si l'on tient absolument à un enregistrement de l'intensité lumineuse d'un foyer donné, le photomètre à sélénium permet de résoudre le problème plus simplement puisqu'il le ramène à l'inscription des variations de l'intensité d'un courant.

(1) *La Lumière électrique*, vol. IV, p. 367; vol. VII, p. 38.
(2) *La Lumière électrique*, vol. XXIV, p. 85, 1886.
(3) *La Lumière électrique*, vol. XXXIII, p. 407.

Balance photométrique de M. Lion.

60. Le photomètre de M. Lion (1) est basé sur la décomposition de l'iodure d'azote par l'action de la lumière. Ce corps se décompose lentement en donnant lieu à un dégagement d'azote pur variable avec l'intensité de la lumière incidente. M. Guiard a constaté que seules les portions d'iodure qui sont directement frappées par le faisceau lumineux subissent cette décomposition qui est purement superficielle.

M. Lion a combiné un appareil fondé sur ce principe; il se compose de deux récipients égaux et juxtaposés, contenant des quantités égales du réactif préparé dans les mêmes conditions. Au-dessus du liquide sont ménagées deux chambres à gaz de même volume.

Un tube capillaire deux fois recourbé et passant à frottement dans des bouchons en caoutchouc plonge par ses branches verticales dans le liquide des deux vases qu'il met ainsi en communication. Après l'avoir rempli de liquide, on y introduit une bulle d'air destinée à servir d'index (fig. 37).

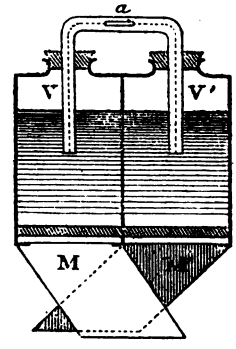


Fig. 37. — Balance photométrique de Lion.

Les vases étant opaques, des fenêtres d'égales dimensions permettent d'éclairer des surfaces égales d'iodure d'azote dans chacun d'eux. En éclairant à l'aide des miroirs M inclinés à 45 degrés l'une des fenêtres avec l'étalon photométrique, l'autre avec le foyer à étudier, l'immobilité de l'index ne sera obtenue que si les volumes d'azote dégagés dans le même temps sont égaux, c'est-à-dire lorsque les fenêtres seront également éclairées.

L'étalon étant maintenu fixe, il suffit de manœuvrer l'autre foyer jusqu'à ce que cette condition soit réalisée, ce qui permet d'appliquer la loi de l'inverse du carré des distances.

M. Lion a perfectionné cet appareil élémentaire afin d'éliminer les causes d'erreur. Nous renvoyons pour la description et la théorie de ce photomètre au mémoire de M. Lion, tout en faisant les mêmes réserves que pour les deux appareils précédents.

Photomètre à pupille.

61. On sait que le diamètre de la pupille diminue lorsque l'intensité de la lumière qui frappe l'œil augmente; cette propriété a pour but de

(1) *Bulletin des sciences physiques*, vol. III, p. 149, 1890.

protéger l'œil contre l'action pernicieuse d'excitations lumineuses trop intenses.

Si l'on connaissait le diamètre de la pupille qui correspond à une intensité donnée d'un faisceau lumineux pénétrant dans l'œil, on aurait dans cet organe un appareil photométrique susceptible d'une assez grande précision. Pour cela il faudrait pouvoir mesurer exactement et rapidement le diamètre de la pupille. C'est ce que permet le photomètre à pupille de Gorham (1).

Cet appareil (fig. 38) se compose d'un tube en bronze de 6 centimètres de longueur sur 4,5 centimètres de diamètre, fermé à une extrémité par un disque qui porte sur son pourtour, et disposés deux par deux suivant les rayons du disque, des trous minuscules; la distance de deux trous voisins varie progressivement de 1,8 à 9,8 millimètres. Le tube est fermé par un couvercle qui est fendu, suivant un rayon, d'une fente si étroite qu'elle ne permet de percevoir que deux trous seulement à la fois; ce couvercle est mobile autour du tube et porte un index qui indique la distance des deux trous observés.

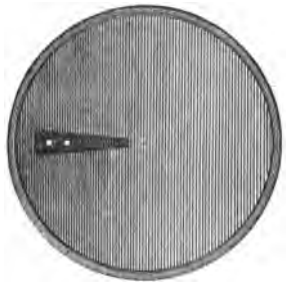


Fig.. 38
Photomètre à pupille.

Pour faire une mesure avec cet appareil, on regarde la source lumineuse au travers des deux trous dégagés par la fente du couvercle; on voit alors deux points lumineux d'aspect assez semblable à celui d'une étoile double; on tourne alors le couvercle jusqu'à ce qu'on trouve une paire de taches lumineuses dont les bords semblent se toucher. Le diamètre de la pupille se trouve alors indiqué sur l'échelle.

Pour faire des mesures photométriques, il faut d'abord pointer l'étalon de lumière placé devant un fond blanc; on pointe ensuite, en se déplaçant, la source de lumière que l'on veut étudier, jusqu'à ce que les taches lumineuses perçues avec la même position du couvercle se touchent de nouveau.

Avant de procéder aux mesures, il faut étalonner son appareil, c'est-à-dire son œil, en déterminant le diamètre de la pupille pour des intensités lumineuses différentes, obtenues par exemple en observant l'étalon photométrique à des distances variables.

Ce procédé est déjà ancien. Lambert avait déterminé au siècle dernier les variations du diamètre de la pupille en observant à des distances variables un trou circulaire percé dans un volet et dirigé contre le ciel. C'est ainsi qu'il a obtenu les valeurs suivantes qui peuvent donner une idée des éléments qui sont en jeu dans ce phénomène.

(1) *La Lumière électrique*, vol. XIV, p. 458.

Distance de l'œil à la source lumineuse.	Angle visuel de la source lumineuse.	Diamètre de la pupille en lignes.
1	8°36′	1,14 (2,4 mm.)
2	4°20′	1,50
3	2°53′	1,70
4	2°10′	1,89
5	1°44′	2,08
6	1°26′	2,31
7	1°14′	2,53
8	1°05′	2,78
9	0°58′	2,89
10	0°56′	3,15

Photomètres de Wheatstone et de Masson.

62. On peut aussi construire des photomètres basés sur la durée de la sensation lumineuse. Wheatstone et Masson, en particulier, ont construit des photomètres de ce genre.

Le photomètre de Wheatstone se compose d'une boule d'acier, brillante, fixée sur un disque placé excentriquement sur une roue dentée qui engrène sur la circonférence intérieure d'un disque denté. On peut faire mouvoir rapidement la boule à l'aide d'une manivelle qui agit sur le jeu d'engrenages; si, pendant le mouvement, on fait tomber sur l'appareil un faisceau lumineux, l'œil percevra par suite de la réflexion sur la boule mobile une figure fermée composée d'épicycloïdes. Il suffit d'éclairer l'appareil par deux sources lumineuses pour obtenir deux figures dont on détermine l'égalité d'intensité lumineuse en déplaçant les deux sources.

Dans le photomètre de Masson (1), on utilise un disque sur lequel sont peints des secteurs alternativement blancs et noirs; ce disque paraît uniformément gris lorsqu'il est mis en rotation rapide, tandis qu'au moment où il est subitement éclairé, le disque semble immobile et les secteurs apparaissent distinctement noirs et blancs. En éloignant suffisamment la source de lumière, l'éclairement devient trop faible pour qu'il soit possible de distinguer les secteurs et le disque paraît de nouveau uniformément gris. La mesure photométrique consiste à éloigner successivement les deux foyers lumineux jusqu'à ce que le disque soit d'un gris uniforme; les intensités des deux sources que l'on compare sont alors inversement proportionnelles au carré des distances.

F. — Spectrophotométrie.

63. Le problème général de la photométrie, c'est-à-dire la comparaison des foyers lumineux diversement colorés, ne peut être résolu que d'une

(1) *Annales de chimie et de physique*, 5e série, vol. XIX.

manière approximative par les méthodes décrites précédemment. Pour le résoudre rigoureusement il faut comparer les rapports des intensités de chacune des radiations simples qui composent la lumière émise par chaque foyer. Or cette comparaison ne peut être effectuée qu'à l'aide des spectrophotomètres. Mais la difficulté et la longueur des mesures spectrophotométriques s'opposent à ce que ces appareils deviennent jamais d'un usage courant dans la pratique industrielle.

La description et l'étude des spectrophotomètres sortent donc du cadre de cet ouvrage ; pour être complet nous donnerons cependant, d'après M. Crova (1), un court aperçu des principaux appareils, en renvoyant pour une étude complète aux mémoires originaux.

64. M. Govi (2) a le premier publié la description d'un photomètre analyseur. Les lumières à comparer sont reçues sur deux prismes rectangles disposés sur une fente, renvoyées par réflexion sur une lentille achromatique et dispersées par un prisme. Les deux spectres juxtaposés sont reçus sur une lame de verre amidonné, identique à celle du photomètre de Foucault, et recouverte d'un écran opaque muni d'une fente qui ne laisse passer qu'une lumière monochromatique des deux spectres. On ramène à l'égalité les intensités des deux plages éclairées en faisant varier convenablement les distances des deux sources de lumière. M. Govi a aussi proposé de les polariser à angle droit et de les ramener à l'égalité d'intensité par la rotation d'un nicol analyseur, comme l'avait déjà fait Arago dans ses recherches photométriques.

65. Plus tard, M. Vierordt (3) fit connaître un spectrophotomètre qu'il appliqua à l'analyse qualitative des substances colorées dissoutes dans les liquides. Le spectrophotomètre de M. Vierordt est un spectroscope ordinaire dont la fente est formée, d'un côté, par une lame continue, de l'autre, par une lame identique à la première que l'on a coupée en deux parties égales, dont chacune est mobile au moyen d'une vis micrométrique ; on obtient ainsi deux fentes d'inégale largeur qui donnent dans le spectroscope deux spectres superposés d'intensités différentes. Si les demi-fentes reçoivent des lumières d'inégales intensités, ou bien si l'une reçoit une lumière directe, l'autre cette même lumière modifiée par l'absorption qu'elle a subie en traversant un milieu coloré, on peut rendre égales les intensités d'une même radiation simple dans les deux spectres en faisant varier convenablement les largeurs des deux demi-fentes ; les intensités sont alors en raison inverse des largeurs des fentes.

Cette disposition suffit quand les intensités à comparer ne sont pas très différentes ; dans le cas contraire, il faut beaucoup élargir l'une des deux demi-fentes, et le spectre correspondant devient de plus en plus

(1) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, vol. XIV.
(2) *Comptes rendus*, vol. L, p. 156, 1860.
(3) *Poggendorff's Annalen*, 5e série, vol. XX, p. 172, 1870.

impur par suite de la superposition de radiations de réfrangibilités différentes en un même point du spectre ; les deux teintes à comparer ne peuvent plus alors être rendues identiques. Dans ce cas, M. Vierordt fait usage de verres légèrement enfumés, qu'il place sur le parcours de la lumière la plus intense, de manière à rendre l'intensité de son spectre peu différente de celle de l'autre ; l'égalité d'intensité est alors obtenue par une faible variation de la largeur des fentes.

66. Il devient alors nécessaire de déterminer pour chacun des verres enfumés les coefficients d'absorption correspondant aux diverses radiations simples. M. Trannin (1) a construit un photomètre plus commode. Il a utilisé le phénomène de la disparition des franges complémentaires de deux lumières polarisées à angle droit. Ce principe avait été déjà appliqué par Babinet, Wild et par d'autres physiciens. Les deux lumières, réfléchies par deux prismes rectangles placés sur les deux moitiés de la fente du spectroscope, sont d'abord polarisées par un prisme de Foucault, puis traversent une lame de quartz parallèle à l'axe, et enfin un prisme de Wollaston qui donne deux images polarisées à angle droit de chacune des moitiés de la fente. Le prisme dispersif donne ainsi quatre spectres, dont deux, polarisés à angle droit et provenant des deux moitiés de la fente, se superposent partiellement au milieu du champ. L'interposition du quartz a pour effet de produire dans les quatre spectres des cannelures dont les intensités sont complémentaires dans deux spectres polarisés à angle droit; elles doivent donc disparaître dans la région où les deux spectres se superposent, dès que l'on aura rendu égales les intensités des deux spectres au point considéré. On arrive à ce résultat soit en faisant varier les distances des deux lumières à l'instrument, soit en interposant entre le prisme de Wollaston et le prisme dispersif un prisme de Foucault, qui par une rotation convenable produit l'égalité des deux intensités.

67. M. Glan (2) a imaginé un spectrophotomètre dont la construction est analogue à celle de l'instrument de M. Trannin, mais qui en diffère par la méthode adoptée pour obtenir l'égalité des intensités des deux spectres contigus.

Le fente du spectroscope est partagée en deux parties égales par une lame transversale de laiton noirci. On obtient ainsi deux spectres séparés par un intervalle obscur. Un prisme de Wollaston placé après l'objectif du collimateur dédouble l'image de chaque demi-fente en deux autres polarisées à angle droit, de sorte qu'on a, non plus deux, mais quatre spectres polarisés deux à deux à angle droit. Pour une largeur convenable de la lame transversale de laiton, le spectre inférieur de la demi-fente supérieure est tangent au spectre supérieur de la demi-fente

(1) *Journal de physique*, vol. V, p. 297, 1876.
(2) *Wiedemann's Annalen*, vol. I, p. 353, 1877.

inférieure, et l'on conçoit qu'au moyen d'un nicol mobile sur un cercle divisé, placé entre le prisme de Wollaston et le prisme dispersif, on puisse, par une rotation convenable, obtenir l'égalité d'intensité des deux plages monochromatiques adjacentes dans les deux spectres contigus fournis par les deux lumières à comparer. Soient I_1 l'intensité de la radiation λ du spectre inférieur de la demi-fente supérieure, I_2 celle de la même radiation dans le spectre supérieur, a_1 et a_2 les coefficients d'affaiblissement dus aux réfractions et aux absorptions que subissent les deux faisceaux dans l'appareil, et α l'angle des sections principales du prisme de Nicol et du prisme de Wollaston ; on aura :

$$I_1 a_1 \cos^2\alpha = I_2 a_2 \sin^2\alpha$$
$$I a \cos^2\alpha = i a' \sin^2\alpha.$$

Si l'intensité de la première radiation vient à changer et devient I'_1, l'intensité de l'autre demeurant constante, il faut une rotation α' pour rétablir l'égalité des intensités; on a donc :

$$I'_1 a_1 \cos^2\alpha' = I_2 a_2 \sin^2\alpha',$$

d'où

$$\frac{I_1}{I'_1} = \frac{\tang^2\alpha'}{\tang^2\alpha}.$$

Afin de bien apprécier l'égalité d'intensité des deux plages contiguës, on se débarrasse de toute lumière étrangère au moyen d'une fente formée de deux lames de laiton noirci mobile dans le plan focal de la lunette, et dont on règle l'écartement de manière à n'admettre que les radiations à comparer.

Mais, pour que cette comparaison puisse être faite avec précision, il faut que les deux plages lumineuses soient amenées au contact sans être séparées par une ligne lumineuse ou obscure.

Or les deux spectres à comparer ont subi, par suite de la dispersion spéciale que leur a imprimée le prisme de Wollaston, des déviations inégales dans un sens perpendiculaire à leur longueur. Dans les deux, le violet est plus dévié que le rouge, et, comme les déviations ont lieu pour les deux en sens inverse, le contact rigoureux n'est obtenu que pour une région déterminée des spectres, au milieu par exemple, tandis que vers le violet les deux spectres empiètent l'un sur l'autre et que vers le rouge ils sont séparés par un intervalle obscur. Pour obtenir cependant le contact de deux plages appartenant à une région quelconque des deux spectres, on écarte ou on rapproche convenablement la fente de l'objectif du collimateur, ce qui fait varier le rapport de la largeur de la lame de laiton à la distance des images des deux demi-fentes au prisme de Wollaston.

Quand on se sert de cet instrument pour comparer deux sources lumineuses, il faut recouvrir l'une des demi-fentes d'un prisme rectangle qui renvoie par réflexion totale dans l'axe de l'instrument la lumière de l'une

des sources placée latéralement, tandis que l'autre est reçue directement sur l'autre demi-fente.

Spectrophotomètre de M. Crova.

68. M. Crova (1) a modifié le spectrophotomètre de M. Glan afin de le rendre plus précis. Voici la description de cet appareil.

La lampe à étudier L′ (fig. 39) est placée devant une ouverture circulaire, pratiquée dans une boîte rectangulaire, noircie intérieurement, et envoie des rayons sur la partie inférieure de la fente F, dont on peut régler à volonté la largeur à l'aide de la vis V. Par une ouverture latérale de la boîte, on reçoit sur un prisme à double réflexion totale P, recouvrant seulement la moitié supérieure de la fente F, la lumière émise par la lampe étalon I, qui a traversé un nicol N, lequel est mobile sur son cercle gradué *cc*.

Les rayons émanés des deux sources traversent, à partir de la fente F,

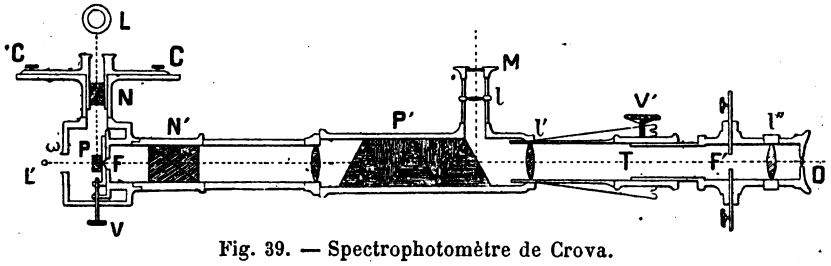


Fig. 39. — Spectrophotomètre de Crova.

un nicol analyseur N′ fixe et un système P′ de prismes formant spectroscope à vision directe, et s'étalant en deux spectres superposés et contigus.

Ces spectres sont examinés au moyen d'un oculaire *l″* fixé à l'extrémité d'un tube M″, que l'on peut déplacer latéralement au moyen d'une vis V′ à crémaillère, de manière à parcourir tout le champ spectral. On se débarrasse de toute lumière étrangère aux radiations que l'on veut comparer, au moyen d'une fente F′, formée par deux lames de laiton noirci, mobiles dans le plan focal de la lunette *l′ l‴*, et dont on règle l'écartement à volonté.

Dans cet appareil, par l'emploi d'un prisme à double réflexion totale, on annule la polarisation elliptique par réflexion totale. Pour que l'instrument puisse servir à l'étude photométrique des raies spectrales, et surtout pour avoir des points de repère, on dispose latéralement un micromètre M, comme dans tout spectroscope à vision directe.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 5e série, vol. XIX, p. 495 et vol. XXIX, p. 556.

CHAPITRE III

LES ÉTALONS PHOTOMÉTRIQUES

Introduction.

69. Le premier étalon photométrique a été la bougie que Bouguer a constamment employée dans ses recherches.

Tant qu'on n'a eu à mesurer que de faibles pouvoirs éclairants, la bougie a pu suffire comme terme de comparaison, abstraction faite, bien entendu, de la constance et de la comparabilité.

Pour les mesures photométriques relatives à l'éclairage au gaz, MM. Dumas et Regnault ont reconnu la nécessité d'un étalon à la fois plus constant, plus comparable à lui-même et plus intense. Ils ont alors adopté la lampe Carcel qui a donné entre leurs mains des résultats précis et qui, depuis, a été employée généralement, en France, pour toutes les mesures photométriques industrielles.

En France, M. Giroud, et en Angleterre, M. Methven, ont cherché à représenter l'étalon lumineux au moyen d'une flamme alimentée par le gaz d'éclairage ordinaire, tel qu'il est livré à la consommation; mais ces étalons dépendent, dans une certaine mesure, de la composition du gaz.

M. Vernon-Harcourt, de Londres, a cherché à produire un gaz de composition constante en utilisant, comme combustible, de l'air carburé par des carbures d'hydrogène volatils extraits du pétrole, principalement par du pentane. Le brûleur employé est un bec-bougie de dimensions bien définies et l'écoulement du gaz est réglé automatiquement.

Il faut mentionner également, parmi les étalons lumineux à combustion, la lampe à acétate d'amyle de M. Hefner-Alteneck, qui donne une lumière d'une constance très satisfaisante mais d'une intensité très faible. Dans cette lampe à combustion libre, la mèche plonge dans de l'acétate d'amyle qui a donné de meilleurs résultats que d'autres hydrocarbures, la benzine et la ligroïne par exemple.

Dans les lampes à pétrole qui sont universellement répandues, l'ascension du pétrole dans la mèche a lieu seulement sous l'action de la capillarité; il en résulte des variations d'intensité lumineuse considérables suivant la hauteur du liquide dans le réservoir. En outre la composition des pétroles du commerce est loin d'être constante.

Pour que l'élalon photométrique fourni par les appareils précédents soit utilisable, il faut que la flamme soit toujours indentique, que le comburant et le combustible aient une composition constante et que la combustion ait lieu dans des conditions invariables. Or, les étalons à flamme subissent dans une large mesure l'influence de toute modification apportée à l'état du comburant. Ainsi une bougie et une lampe Carcel s'écartent très rapidement du régime normal, lorsqu'on les place dans une pièce un peu petite contenant plusieurs observateurs.

En outre, le pouvoir éclairant d'un corps lumineux dépend de sa température : il croît très rapidement avec elle, de sorte que, plus la température d'une source lumineuse est élevée, plus il est nécessaire d'en obtenir la constance, sans laquelle l'intensité lumineuse serait essentiellement variable.

Or, dans une flamme, la constance de la température n'est pas facile à réaliser, car elle exige que le mélange du combustible et du comburant s'effectue toujours dans des conditions identiques. Si ce mélange n'est pas parfait et identique à lui-même, la température varie et l'éclat varie encore davantage.

Enfin une flamme est toujours transparente et la quantité de lumière émise varie avec le degré de transparence. Pour qu'une flamme émette des radiations lumineuses constantes, il ne suffit pas que la température soit invariable, il faut encore que la transparence de la flamme et son épaisseur ne subissent aucun changement.

Pour fournir une unité de lumière satisfaisante, une flamme doit donc satisfaire à un ensemble de conditions bien difficiles à réaliser complètement. Ce sont ces difficultés qui ont engagé la commission internationale des unités électriques à rejeter définitivement, comme étalon absolu, les étalons à combustion, et à adopter l'étalon au platine proposé par M. Violle.

Les avantages d'un étalon lumineux basé sur l'incandescence d'un corps porté à une haute température, à la température de fusion du platine par exemple, ont été reconnus depuis longtemps par tous les physiciens. En 1844 déjà, Draper indiquait la possibilité de prendre comme unité la lumière émise par un fil de platine rendu incandescent par le passage d'un courant électrique, et plus tard, en 1859, Zoellner préconisait aussi la même idée. Celle-ci fut reprise en 1878 par M. Schwendler, à Calcutta, qui fit de nombreux essais avec un appareil construit dans le but de réaliser cet étalon photométrique.

L'étalon Schwendler au platine est excellent en théorie, mais ne peut livrer de résultat pratique satisfaisant, à cause des modifications que subit le platine à la suite d'une incandescence un peu prolongée. Sous l'action du courant électrique il se produit, dans le fil de platine, des modifications continues auxquelles correspondent des changements

de résistance électrique et, par conséquent, avec un même courant, des changements de température.

Les lampes à incandescence, telles qu'on les fabrique actuellement, sont affranchies d'une partie seulement de ces défauts; l'intensité lumineuse pour un régime constant varie, quoique très lentement, mais l'énergie dépensée dans la lampe se partage différemment suivant la nature du charbon en énergie calorifique et en énergie lumineuse.

Au congrès international des électriciens, en 1881, M. Violle a proposé comme étalon absolu de lumière la lumière émise sous l'incidence normale par 1 centimètre carré de platine porté à sa température de fusion et en voie de solidification.

Le phénomène employé ici a l'avantage d'être constant et susceptible de se reproduire toujours identique à lui-même. Un métal liquide en voie de se solidifier constitue, si ce métal est en outre inaltérable comme le platine, un corps à température fixe. La température reste en effet invariable aussi longtemps qu'une partie de la masse reste liquide. Si ce métal est inaltérable, comme le platine, il aura toujours le même pouvoir émissif. Sous une surface donnée, il émettra toujours la même quantité de lumière. La qualité de cette lumière dépend de la température : le platine, étant le plus réfractaire des métaux usuels, sera celui qui, à son point de fusion, donnera la lumière la plus blanche.

A la suite des recherches entreprises par M. Violle et qui ont démontré l'exactitude des arguments par lesquels il appuyait sa proposition auprès du congrès, la commission internationale des unités électriques, réunie à Paris en 1883, a définitivement adopté comme étalon absolu de lumière blanche l'étalon proposé par le savant français.

Étalon absolu et étalons secondaires.

70. Avant d'étudier en détails les principaux étalons photométriques, il faut examiner de près l'importance relative d'un étalon absolu et des étalons secondaires. La différence entre ces deux catégories d'étalons est analogue à celle qui existe par exemple entre le mètre et le kilogramme prototypes en platine iridié, et leurs copies usuelles en fer, en laiton ou en bois.

Le mètre et le kilogramme prototypes ont été construits selon leur définition avec toute l'exactitude que comportent les méthodes modernes, et sont conservés de façon à en garantir la parfaite invariabilité. On a ensuite établi les étalons nationaux qui servent dans chaque pays aux comparaisons des unités usuelles du commerce et de l'industrie.

Il doit en être de même pour l'unité de lumière, avec une différence toutefois. Les prototypes du système métrique peuvent être représentés matériellement, et cette représentation est invariable en un lieu donné. Il ne peut en être de même de l'étalon lumineux absolu, ni des

étalons secondaires; ils doivent être construits chaque fois que l'on veut en faire usage, et il faut, pour les entretenir, dépenser une certaine quantité d'énergie.

La valeur de l'étalon de lumière dépend de l'énergie dépensée et des conditions dans lesquelles cette transformation d'énergie s'effectue. La seule chose que l'on puisse faire, c'est d'employer des appareils de dimensions déterminées et donnant, dans des conditions fixes, la même intensité lumineuse.

L'étalon absolu et les étalons secondaires doivent être autant que possible indépendants des écueils signalés plus haut; cette condition est nécessaire pour l'étalon absolu; elle en rend la construction et la reproduction difficiles, en sorte qu'on ne peut songer à l'employer dans la pratique industrielle. Aussi l'emploi des étalons secondaires s'impose-t-il nécessairement.

Il suffit, en effet, de construire l'étalon absolu en un lieu donné et de faire toutes les comparaisons des étalons secondaires dans les conditions de fonctionnement les plus diverses. Le choix de l'étalon absolu étant fait d'une façon judicieuse, on peut ensuite faire profiter les étalons secondaires de tous les perfectionnements et de toutes les simplifications indiquées par un usage prolongé, sans introduire de confusion dans les mesures, puisque leur valeur est toujours exprimée en fonction de l'étalon absolu.

Suivant la nature des sources lumineuses à comparer, on emploie comme unité de comparaison l'étalon dont l'intensité lumineuse donne le plus de facilité ou de précision aux recherches. Ces étalons secondaires sont alors les multiples et les sous-multiples de l'étalon absolu, de la même manière que dans le système métrique le kilomètre est un multiple et le centimètre un sous-multiple du mètre.

Il suffit que l'étalon secondaire soit d'une constance suffisante pour la pratique courante; tandis qu'on peut, raisonnablement, exiger de l'étalon absolu une constance de 0,5 p. 100, on peut être satisfait de l'étalon secondaire si cette constance est réalisée à 2 p. 100 près. Ces considérations montrent bien que l'unification de l'étalon secondaire n'est pas nécessaire et serait même désavantageuse dans certains cas, l'accord intervenu pour l'étalon absolu réalisant l'unification complète des mesures photométriques.

Équivalent mécanique de l'unité de lumière.

71. L'étalon de lumière étant défini, il est intéressant de rechercher quelle est l'énergie des radiations lumineuses qu'il émet. Cette quantité est assez facile à déterminer.

Il suffit de mesurer à l'aide d'un thermomètre à air l'énergie corres-

pondant à la totalité des radiations émises par le foyer lumineux, puis, à l'aide d'une pile thermo-électrique, le rapport entre l'énergie des radiations lumineuses et celle de toutes les radiations. Une simple multiplication donne ensuite l'énergie correspondant aux radiations lumineuses ou l'équivalent mécanique de la lumière émise par ce foyer.

C'est ce procédé que M. Tumlirz (1) a employé pour déterminer l'équivalent mécanique de la lumière émise par la flamme de l'étalon Hefner à acétate d'amyle. Il a trouvé :

$$k = 0{,}00361 \text{ petite calorie par seconde,}$$

ou en transformant :

$$k = 151\,500 \text{ ergs par seconde,}$$

ce qui correspond au travail électrique d'un courant de 0,1226 ampère dans un conducteur de 1 ohm.

On peut aussi exprimer ce résultat comme suit : la flamme de la lampe à acétate d'amyle étant située à 1 mètre de distance d'un élément de surface d'un centimètre carré, placé de telle sorte que sa normale soit horizontale et passe par le centre de la flamme, la quantité de lumière qui frappe en une seconde cet élément de surface correspond à une quantité de chaleur de 361.10^{-9} petites calories par seconde ou à un travail de 15,15 ergs.

Si l'œil se trouve à la place de cet élément de surface et si l'on suppose que la pupille ait une ouverture de 3 millimètres, la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil correspond à un travail de 1,07 erg par seconde ; ce travail ne parviendrait à élever d'un degré la température d'un gramme d'eau qu'au bout d'une année et 89 jours.

La valeur de l'équivalent mécanique de l'étalon à l'acétate d'amyle étant déterminée, une simple comparaison photométrique permet de trouver l'équivalent mécanique des autres étalons lumineux. M. Tumlirz a trouvé de cette manière, pour la bougie allemande, la valeur suivante :

$$k' = 0{,}00147 \text{ petite calorie} = 187\,900 \text{ ergs.}$$

L'ÉTALON CARCEL.

72. La lampe Carcel est une simple modification de la lampe d'Argand; on sait que le constructeur genevois produisit, en 1787, une révolution dans l'éclairage, en remplaçant la mèche plate brûlant à l'air libre par une mèche ronde donnant passage, dans son milieu et sur sa périphérie, à un double courant d'air produit par une cheminée en métal placée au-dessus de la flamme. On remplaça bientôt cette cheminée métallique par un tube en verre muni, à la hauteur de la flamme,

(1) *Wiedemann's Annalen*, vol. XXXV.

d'un étranglement qui force l'air à s'en rapprocher et qui provoque ainsi une combustion complète.

En 1800, Carcel fit subir à la lampe d'Argand une modification importante permettant d'obtenir une alimentation d'huile très régulière. Dans cette modification le réservoir d'huile est placé dans le pied de la lampe et, grâce à un mécanisme d'horlogerie qui actionne deux petites pompes situées dans le socle, l'huile s'élève au niveau de la partie supérieure de la mèche. La quantité d'huile élevée doit être supérieure à celle qui alimente la combustion et l'excédent retombe dans le réservoir; la mèche, constamment baignée d'huile au point où la combustion a lieu, se charbonne très lentement et donne une lumière à peu près constante.

Le mécanisme étant exposé à se déranger, on emploie plus volontiers la lampe à modérateur, dans laquelle la pression d'un ressort sur un piston produit le même effet que le mouvement d'horlogerie; l'écoulement de l'huile est rendu sensiblement constant par l'emploi d'un tube étroit fixé au piston et dans lequel s'engage une tige modératrice fixe qui l'obstrue d'autant moins que le piston est plus bas et la pression du ressort plus faible.

Lors des études photométriques relatives à l'éclairage des phares, Arago et Fresnel ont employé la lampe à huile. Fresnel a montré qu'on peut, moyennant certaines précautions, obtenir une constance très grande, entre certaines limites. Détail piquant qu'il est bon de rappeler pour montrer les soins qu'il faut apporter aux mesures photométriques, Fresnel tenait à garnir et à entretenir lui-même les lampes dont il se servait; il prenait, en outre, les précautions les plus minutieuses pour assurer la constance et la comparabilité de cet étalon.

La lampe Carcel fut adoptée ensuite par Dumas et Regnault pour les essais photométriques de l'éclairage au gaz de la ville de Paris. Les bons résultats obtenus à cette occasion et l'autorité des deux savants provoquèrent une adoption générale de cette unité de lumière par les compagnies du gaz en France. Les conclusions de Dumas et Regnault furent énoncées après une longue série de recherches faites au laboratoire municipal de Paris par MM. Audoin et Bérard (1); ces derniers ont indiqué les conditions à réaliser pour assurer la constance et la comparabilité de l'étalon Carcel.

73. L'intensité lumineuse de la lampe Carcel dépend de plusieurs circonstances dont les principales sont la hauteur de la mèche, sa nature, et la hauteur de l'étranglement du verre au-dessus du niveau de la mèche.

MM. Audoin et Bérard ont étudié l'influence de chacune de ces conditions sur l'intensité et la dépense du bec Carcel.

(1) *Ann. de chim. et de phys.* (3e série), vol. LXV.

TABLEAU I

HAUTEUR DE LA MÈCHE.	MÈCHE FINE.		MÈCHE MOYENNE.		MÈCHE GROSSE.	
	DÉPENSE D'HUILE par heure.	DÉPENSE DE GAZ calculée pour égaler le carcel brûlant 42 g.	DÉPENSE D'HUILE par heure.	DÉPENSE DE GAZ calculée pour égaler le carcel brûlant 42 g.	DÉPENSE D'HUILE par heure.	DÉPENSE DE GAZ calculée pour égaler le carcel brûlant 42 g.
m.m.	gr.	litres.	gr.	litres.	gr.	litres.
4	27	96	30	155	32	99
6	33	175	36	193	36	159
8	38	196	42	185	42	192
10	40	190	42	200	45	194
12	35	170	40	193	48	212
14	38	177	40	»	51	216
16	36	180	45	186	48	189
18	31	153	»	»	42	192

Le tableau I donne les résultats des essais effectués avec des hauteurs différentes de la mèche; le tableau II donne les résultats des mesures faites avec une hauteur de mèche constante de 7 millimètres, mais en variant la disposition du verre. L'intensité lumineuse relative est donnée par le nombre de litres de gaz dépensés par le brûleur à gaz pour donner une lumière égale.

TABLEAU II

HAUTEUR DU COUDE au-dessus du niveau de la mèche.	MÈCHE FINE.		MÈCHE MOYENNE.		MÈCHE GROSSE.	
	DÉPENSE D'HUILE par heure.	DÉPENSE DE GAZ calculée pour égaler le carcel brûlant 42 g.	DÉPENSE D'HUILE par heure.	DÉPENSE DE GAZ calculée pour égaler le carcel brûlant 42 g.	DÉPENSE D'HUILE par heure.	DÉPENSE DE GAZ calculée pour égaler le carcel brûlant 42 g.
m.m.	gr.	litres.	gr.	litres.	gr.	litres.
— 2	18	24	18	11	15	23
+ 3	25	63	21	57	27	»
7	36	187	39	161	48	175
12	39	199	42	200	50	186
19	42	151	45	175	51	164
24	46	315	45	161	54	140
29	file	»	51	133	»	»

Les chiffres qui précèdent montrent donc que l'intensité du bec Carcel dépend :

1° De la hauteur de la mèche; celle-ci augmentant, la dépense d'huile et l'intensité lumineuse croissent jusqu'à une hauteur de 10 millimètres pour la mèche moyenne; au delà de cette limite, les deux quantités diminuent;

2° De la mèche adoptée; la mèche moyenne est la meilleure, car elle donne la plus forte intensité lumineuse, à dépense égale;

3° De la hauteur de l'étranglement de la cheminée de verre au-dessus du niveau de la mèche; l'élévation de l'étranglement tend à augmenter la dépense d'huile dans une proportion toujours croissante; mais il existe une hauteur du col de verre qui correspond à un maximum de pouvoir éclairant. Ainsi, dans la mèche moyenne des essais ci-dessus, la hauteur du coude doit être à 7 millimètres au-dessus du niveau de la mèche.

Dimensions et conditions de fonctionnement de la lampe Carcel.

74. Les dimensions et les conditions de fonctionnement de l'étalon Carcel, telles que les ont indiquées Dumas et Regnault dans leur instruction pratique pour l'essai du gaz, sont données ci-dessous (fig. 40).

Diamètre extrême du bec	23,5 m.m.
— intérieur (au courant d'air intérieur)	17,0
— du courant d'air extérieur	45,5
Hauteur totale du verre	290,0
Distance du coude à la base du verre	61,0
Diamètre extérieur au niveau du coude	47,0
— exterieur du verre pris au haut de la cheminée	34,0
Épaisseur moyenne du verre	2,0

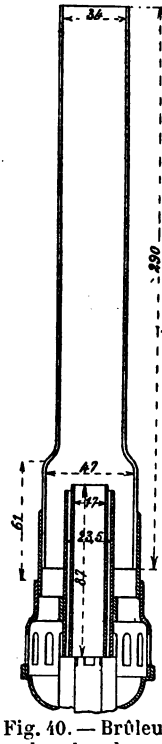


Fig. 40. — Brûleur de la lampe Carcel.

La mèche adoptée est la mèche moyenne, dite mèche des phares; la tresse est composée de 75 brins et pèse 3gr,6 par décimètre. Les mèches doivent être conservées dans un endroit sec ou plutôt dans une boîte à double fond contenant de la chaux vive.

La lampe Carcel brûle de l'huile de colza bien épurée. D'après M. Crova, la composition de l'huile de colza dont on fait usage dans ces lampes n'est exposée à subir que des variations insignifiantes, car elle est fournie par la graine d'un végétal déterminé, et sa pureté est plus facile à contrôler que celle des autres combustibles, tels que l'acide stéarique, le blanc de baleine, les paraffines, le pétrole, le gaz. Cette huile est épurée au moyen d'une faible quantité d'acide sulfurique qui coagule le mucilage qu'elle contient naturellement et la rend plus limpide et plus fluide.

L'opinion de M. Crova paraît un peu optimiste bien que son auteur ait eu l'occasion d'employer fréquemment la lampe Carcel au cours de ses beaux travaux photométriques. Il faut remarquer en effet que les produits végétaux sont rarement de composition constante et s'altèrent

facilement par les actions extérieures et même par l'action seule du temps, et que le procédé de fabrication n'est pas absolument défini.

75. Il n'y a pas, en général, pour un combustible quelconque, de relation définie entre la quantité de matière brûlée et la lumière produite; mais en adoptant les dimensions indiquées plus haut pour le bec et la cheminée de la lampe Carcel, et en employant la mèche moyenne, on remarque que la quantité de lumière croît proportionnellement à la dépense d'huile, lorsque cette dépense est voisine de 42 grammes à l'heure; cependant il ne faut pas, pour que l'on puisse appliquer la proportionnalité, que la dépense soit inférieure à 38 grammes ni supérieure à 46 grammes.

Deux lampes présentant le même diamètre de mèche et la même capacité peuvent différer dans leur dépense et leur pouvoir éclairant; de plus on a reconnu que la température, l'agitation de l'air, la durée de l'allumage et le degré plus ou moins grand de plénitude de la lampe, ont une influence sur la dépense. Il faut donc, avant de se servir de la lampe Carcel comme étalon, la soumettre à une série d'essais afin d'obtenir rigoureusement les conditions dans lesquelles il faut la placer pour obtenir une dépense à peu près constante.

Ces conditions obtenues, on peut procéder aux mesures photométriques définitives. A chaque expérience, il faut mettre une mèche neuve que l'on coupe à fleur du porte-mèche; on remplit ensuite la lampe jusqu'à la naissance de sa galerie, on l'allume après, en maintenant d'abord la mèche à 5 ou 6 millimètres de hauteur, puis on place le verre.

On règle la dépense d'huile en élevant la mèche à une hauteur de 10 millimètres et le verre de telle sorte que le coude soit à une hauteur de 7 millimètres au-dessus du niveau de la mèche; pour réaliser facilement ces conditions, on fait affleurer la pointe inférieure du petit appareil qui est adapté au porte-mèche avec la mèche elle-même et la pointe supérieure avec un trait au diamant tracé sur le col du verre.

La dépense et l'intensité augmentent légèrement pendant la première demi-heure, à cause de l'échauffement du bec; au bout de ce temps, il s'établit un régime constant qui dure plus d'une heure; c'est pendant cette période que l'on fait les observations photométriques; puis, la dépense et l'intensité vont en diminuant lentement, à mesure que la mèche se carbonise sur une longueur de plus en plus grande.

76. La lampe doit consommer 42 grammes d'huile; quand la consommation descend au-dessous de 38 grammes ou qu'elle s'élève au-dessus de 46 grammes, l'essai doit être rejeté. Lorsque la consommation s'est maintenue dans les limites ci-dessus, on ramène, par une simple proportion, l'intensité lumineuse à celle qui correspond exactement à 42 grammes d'huile brûlée à l'heure.

Pour régler la consommation de la lampe, on la suspend à l'extrémité d'un des bras de levier d'une balance équilibrée au moyen d'une

tare; l'équilibre étant obtenu à un instant déterminé, on place un poids de 10 grammes à côté de la lampe; dès que ce poids d'huile est brûlé, la balance revient à sa position d'équilibre; or l'aiguille de la balance est munie d'une échancrure en son milieu et celle-ci détermine, au moment de l'équilibre, le départ d'un marteau, qui, en frappant sur un timbre, avertit l'opérateur; celui-ci lit alors sur un compteur à seconde le temps nécessaire pour brûler 10 grammes d'huile. L'appareil a été construit par M. Deleuil qui lui a donné une forme très pratique (fig. 54).

La consommation normale de l'étalon Carcel étant de 42 grammes par heure, il faut 14 minutes 17 secondes pour brûler les 10 grammes. Le compteur à secondes permet de déterminer dans chaque expérience la quantité d'huile que la lampe consomme en une heure et de reconnaître si l'on est dans les limites indiquées plus haut. Si, par exemple, le compteur marque $15^m,30$, soit $15^m,5$ la proportion $10/15,5 = x/60$ donne immédiatement $38^{gr},7$ comme consommation d'huile par heure.

L'étalon Carcel n'est comparable à lui-même qu'à la condition d'adopter les dimensions indiquées précédemment. Dans la lampe Carcel, la couche qui émet la lumière a la forme d'un cylindre creux compris entre deux couches cylindriques, l'une extérieure, l'autre intérieure, où la combustion des hydrocarbures se fait sans dépôt de carbone et à une température très élevée. Dans la couche intermédiaire qui rayonne la lumière les hydrocarbures sont dissociés avec formation de carbone solide incandescent; ce dernier est porté à une température d'autant plus élevée que les deux couches non lumineuses entre lesquelles il se trouve sont portées à une plus haute température, ce qui arrive lorsque le tirage de la cheminée est très actif. Cela montre bien l'importance d'une détermination exacte des conditions de la combustion.

Valeur pratique de la lampe Carcel.

77. Les avis sont très partagés relativement à la valeur pratique de l'étalon Carcel; tandis que les ingénieurs français vantent ses qualités, dans les autres pays on fait usage d'autres étalons photométriques. A cet égard, la discussion qui a eu lieu au congrès international des électriciens, en 1881, et à la conférence internationale de 1882, est très instructive.

Les savants français, MM. Dumas, Allard, Crova, etc., insistaient tous sur les avantages de la lampe Carcel, avantages reconnus avec assez de difficulté par les savants étrangers qui mettaient cet étalon sur le même rang que la bougie,

Les nombreuses expériences de M. Crova ont montré que deux lampes Carcel très différentes, comparées pendant une heure, donnent des indications dont les variations atteignent de 2 à 3 p. 100 au plus.

D'après M. Leblanc (1), les employés chargés de la vérification du gaz au bureau municipal de Paris acquièrent facilement une expérience telle qu'ils règlent très exactement la consommation entre 41 et 42 grammes par heure. Il résulte des mesures effectuées journellement dans ce bureau que la lampe Carcel, bien entretenue et manipulée avec soin, peut donner de bons résultats, bien comparables entre eux.

Cependant cette concordance n'a plus lieu dans la même mesure pour des lampes, des mèches et de l'huile de colza de provenances diverses; c'est probablement à ces causes qu'il faut attribuer les grandes divergences constatées, à plusieurs reprises, par les ingénieurs étrangers qui ont fait servir la lampe Carcel, à leurs comparaisons photométriques, mais sans suivre exactement les indications si minutieuses données par MM. Dumas et Regnault.

Il est de la plus haute importance d'observer exactement toutes les précautions indiquées par ces deux savants; alors seulement on peut avoir des résultats vraiment comparables à ceux d'autres observateurs, travaillant dans des conditions analogues.

M. Leblanc recommande de faire usage de deux lampes dont chacune sert alternativement pendant un jour; lorsqu'une lampe reste plusieurs jours sans fonctionner, l'huile s'épaissit et le mécanisme se détériore.

Nous n'avons considéré, jusqu'à présent, que les avis de ceux qui préconisent l'emploi de la lampe Carcel, après l'avoir essayée pendant fort longtemps. Cependant il ne faut pas se dissimuler que cet étalon offre aussi des inconvénients sérieux.

Pour en donner une idée, nous ne pouvons mieux faire que de citer le passage suivant d'une communication de M. Hartley (2) à la *B. A. of gas managers*, en 1880.

« Le très grand nombre d'essais que j'ai faits en 1867 avec une lampe Carcel, ne m'encourage pas à ajouter foi aux indications de toute lampe alimentée avec des huiles grasses. Je dis huiles grasses, parce que des essais récents avec des lampes brûlant de l'huile de paraffine, ont révélé une grande uniformité dans le pouvoir éclairant de ces lampes.

« Les objections que je formule contre les lampes étalons, c'est qu'elles doivent être entretenues en état de propreté parfaite; que la mèche doit être renouvelée très souvent, sinon à chaque fois qu'on se sert de la lampe (ce dernier point est essentiel avec la lampe Carcel); que la mèche doit être ajustée ainsi que le verre, avec le soin le plus minutieux et la plus grande exactitude, et enfin que, lorsque tout cela a été réalisé, l'on n'a aucune certitude que la quantité d'huile consommée ne sera pas en très grand excès sur la quantité réglementaire.

« Cette variation dans la consommation n'aurait aucun effet si, ainsi

(1) *Procès-verbaux de la conférence internationale*, 1882, p. 145.
(2) *Journal des usines à gaz*, 1882.

que mes expériences me l'ont démontré, la quantité de lumière émise n'augmentait pas souvent en proportion beaucoup plus rapide que la consommation d'huile. Il est, en outre, très difficile de maintenir la consommation de la lampe aussi basse que le taux réglementaire ».

Malgré tous les reproches que l'on peut adresser à la lampe Carcel, elle n'en reste pas moins un étalon lumineux pratique qui a rendu de grands services dans les comparaisons photométriques de l'industrie; son intensité et sa couleur sont à peu près les mêmes que celles des becs de gaz généralement employés.

Pour les comparaisons des foyers électriques à arc, la question se complique, car la flamme de la lampe Carcel est encore trop rouge pour rendre insensibles les différences de teinte qui entravent si considérablement les comparaisons photométriques.

LES BOUGIES.

78. La bougie qui donne, au point de vue de la constance de la lumière émise, de moins bons résultats que les autres étalons lumineux, a joui, jusqu'à maintenant, de la plus grande faveur.

Les lampes à pétrole et à huile fournissent une quantité de lumière qui dépend des dimensions de la mèche ; or il n'y a rien de plus varié que ces dernières, tandis qu'il existe une certaine uniformité dans la composition et les dimensions des bougies que l'industrie produit en si grande quantité. De là l'emploi de ce luminaire comme étalon photométrique usuel.

La pratique a consacré l'emploi de quatre bougies différentes fournissant, même dans des conditions identiques, des quantités de lumière inégales. Il faut donc, lorsqu'on parle de bougies, spécifier celle que l'on entend ; c'est une précaution qui n'a malheureusement pas été observée.

Ces quatre espèces de bougies sont :

1° La bougie stéarique de l'Étoile qui est employée en France, à côté de la lampe Carcel.

2° La bougie de blanc de baleine, *London Standard Spermacetti Candle*, qui est utilisée en Angleterre et aux États-Unis.

3° La bougie de l'Union des gaziers allemands « Vereinskerze », qui est une bougie de paraffine; elle est très employée en Allemagne et en Autriche-Hongrie.

4° La bougie stéarique de Munich, de forme légèrement conique; elle est en usage en Allemagne concurremment avec la bougie de paraffine.

Il faut ajouter encore la *bougie décimale*, définie par le congrès des électriciens de 1889 comme la vingtième partie de l'unité absolue au platine.

Combustion de la bougie.

79. L'intensité lumineuse de ces bougies, brûlant dans des conditions

normales, a été déterminée à plusieurs reprises par un grand nombre d'observateurs qui les ont comparées entre elles ou à la lampe Carcel. Les valeurs obtenues sont très différentes; il en est de même des conclusions relatives à l'invariabilité du pouvoir lumineux de la bougie.

Ainsi, tandis que M. Schwendler dit avoir constaté des variations de 40 à 50 p. 100 dans l'intensité d'une bougie anglaise, M. Hugo Krüss prétend qu'on peut facilement, en observant certaines précautions, arriver à maintenir constante à 5 p. 100 près la lumière émise par la flamme d'une bougie de paraffine.

L'intensité lumineuse de la flamme d'une bougie, quelle que soit la nature du combustible dont cette dernière est formée, dépend de la forme et de la nature de la mèche, très variables avec le mode de fabrication.

La mèche est généralement formée de plusieurs brins de coton tressés et imbibés préalablement d'une solution d'acide borique. Lorsqu'on allume la bougie, la cire se liquéfie, monte par capillarité dans la mèche et se décompose en produits riches en carbures d'hydrogène qui brûlent et en carbone qui se précipite à l'état solide et très divisé dans la partie moyenne de la flamme.

L'enveloppe gazeuse, en contact avec l'air, brûle complètement sans précipitation de carbone, à une température très élevée et sans émission sensible de lumière. La température de cette couche est très élevée et se rapproche certainement, d'après M. Crova, de celle de la fusion du platine.

Le carbone précipité dans la partie moyenne de la flamme, à une température très élevée, subit une combustion qui se produit avec une grande élévation de température, accompagnée d'une vive émission de lumière, par le carbone incandescent.

L'axe de la flamme, relativement froid, est constitué par des produits pyrogénés non encore dissociés; c'est dans cette partie axiale et dans l'enveloppe lumineuse que se trouve la partie inférieure de la mèche qui subit une carbonisation graduelle, à mesure qu'en se recourbant elle se rapproche de la partie extérieure, où elle achève de se brûler complètement; l'acide borique que contient la mèche se fond alors et vitrifie les cendres du coton sous la forme de petits globules dont le poids fait pencher la mèche hors de la flamme et amène ainsi sa combustion complète.

La mèche subit donc des changements continuels de forme et de position; de là des variations dans l'éclat de la flamme qui est inégalement refroidie et modifiée dans sa forme; on peut s'en assurer en plaçant devant un photomètre de Foucault une lampe Carcel et une bougie; si la lampe est réglée de manière à lui assurer la plus grande constance possible, on peut suivre sur l'écran photométrique les variations d'intensité de la bougie et constater leur concordance avec la forme et la position correspondante de la mèche.

L'influence de la torsion de la mèche est aussi très sensible; il faut, autant que possible, que la mèche, tressée bien régulièrement et formée d'un nombre de brins bien déterminé, soit placée sans torsion au milieu de la bougie; si cette condition n'est pas remplie rigoureusement, la courbure de la mèche située dans la flamme change continuellement de direction, parfois même avec de brusques arrêts; il en résulte alors des variations très considérables dans l'intensité lumineuse de la flamme.

L'état plus ou moins grand d'agitation de l'air exerce une influence très grande sur la lumière de la bougie; si l'air est même faiblement agité, les variations dues à cette cause sont très grandes.

Si, pour éviter ces perturbations, on enferme la bougie dans une boîte noircie, munie d'ouvertures destinées à évacuer les produits de la combustion et à admettre de l'air nouveau, le mouvement ascensionnel de l'air dans la boîte exerce aussi une influence très notable sur la composition et l'intensité de la lumière émise.

Plus le mouvement est rapide, plus l'enveloppe extérieure non lumineuse de la flamme se développe, plus aussi la température de la couche moyenne qui rayonne la lumière devient élevée et sa masse moindre, de sorte que, par un tirage de plus en plus fort, de jaune rougeâtre qu'elle était, elle devient de plus en plus blanche et de moins en moins éclairante. On peut constater cet effet en l'exagérant; il suffit d'entourer la bougie d'un large tube de verre faisant fonction de cheminée, et dont le tirage produit d'une manière encore plus marquée les effets indiqués ci-dessus. Il est donc nécessaire de placer la bougie photométrique dans l'air parfaitement calme et libre; mais ce sont là des conditions difficiles à réaliser dans la pratique industrielle. Les variations de la température de la chambre photométrique et de la pression barométrique modifient les conditions de combustion de la bougie; elles ont donc une influence sur son intensité lumineuse.

Pour se rendre autant que possible indépendant des variations indiquées ci-dessus, on a spécifié la quantité de matière brûlée par chaque bougie pendant une heure. Cependant, on n'a pas été longtemps sans remarquer que cette condition n'est pas suffisante dans tous les cas et on a ajouté ensuite la hauteur que la flamme doit avoir pendant les mesures pour que l'intensité lumineuse soit constante.

Bougie de l'Étoile.

80. La bougie française de l'Étoile brûle 10 grammes de matière à l'heure; Péclet a comparé, en 1830, les premières bougies fabriquées chez M. de Milly; il a trouvé qu'elles donnaient une lumière dont l'intensité était égale à $\frac{1}{7}$ carcel. Les bougies de cette qualité sont devenues introu-

vables; les meilleures bougies qui se fabriquent en France ne valent plus que $\frac{1}{8}$ carcel.

D'après M. Monnier, l'emploi de la bougie de l'Étoile comme unité photométrique exige non seulement une consommation de 10 grammes à l'heure, mais une hauteur de flamme de $52^{mm},4$. Les bougies sont de 5 ou 6 au paquet.

Les bougies de cinq pèsent 100 grammes l'une; leurs dimensions sont: longueur totale 306 millimètres, longueur de la partie cylindrique 290 millimètres, diamètre en haut 20 millimètres, diamètre en bas 22 millimètres; la mèche est formée de 81 fils.

Les bougies de six pèsent $83^{gr},3$ l'une; leurs dimensions sont: longueur totale 274 millimètres; longueur de la partie cylindrique 258 millimètres, diamètre en haut 20 millimètres, diamètre en bas $21^{mm},5$; la mèche est formée de 81 fils.

Les comparaisons des bougies de l'Étoile avec les autres bougies n'étant pas nombreuses, vu leur emploi relativement restreint, nous donnerons immédiatement les valeurs les plus probables de cet étalon lumineux en fonction de la lampe Carcel normale.

M. Monnier a trouvé les valeurs moyennes suivantes. Une bougie de l'Étoile vaut 0,136 carcel avec une consommation moyenne de 10 grammes à l'heure et 0,136 carcel également avec une hauteur de flamme de $52^{mm},2$. Pour la bougie de 6 au paquet, les valeurs correspondantes sont 0,131 et 0,132 carcel.

De même 1 carcel normal vaut 7,4 bougies de 5 au paquet ou 7,6 bougies de 6 au paquet, en prenant comme bougie normale celle qui consomme 10 grammes de stéarine à l'heure, ou celle qui donne une flamme de $52^{mm},5$ de hauteur.

Bougie anglaise.

81. L'étalon photométrique anglais est la bougie de blanc de baleine, de 6 à la livre, brûlant 2 grains de matière par minute ou 120 grains (7,776 gr.) par heure. Schwendler indique $8^{gr},26$. Les dimensions de la bougie sont: longueur 252 millimètres, diamètre du haut 20 millimètres, du bas $22^{mm},5$; poids moyen $75^{gr},7$.

Lorsque la consommation réelle de la bougie diffère de ce chiffre, et à la condition qu'elle soit comprise entre 114 et 126 grains par heure, on admet que la valeur éclairante est proportionnelle à la consommation et on fait la correction au moyen d'une simple proportion. La mèche est composée de trois torons ou cordelettes de coton formés chacun de 18 à 21 fils suivant les marques.

La hauteur de flamme adoptée est de 45 millimètres. La composition

et la pureté du blanc de baleine sont exposées à varier considérablement suivant la provenance et le mode d'épuration.

Ainsi MM. Heisch et Hartley mentionnent le fait, avec preuves à l'appui, que les bougies de spermaceti développent maintenant plus de lumière, pour un même poids de matière brûlée qu'autrefois. Ceci est dû aux petits perfectionnements apportés aux mèches, ou aux progrès du traitement du blanc de baleine.

Bougie allemande (Vereinskerze).

82. L'association allemande pour l'industrie du gaz et de l'eau a adopté en 1868 comme bougie photométrique une bougie de paraffine de 6 à la livre et ayant un diamètre uniforme de 20 millimètres ; sa longueur est de 314 millimètres et son poids de $83^{gr},6$. Le point de fusion de la paraffine employée est de 55°c entigrades. La mèche est formée d'une tresse de 25 fils de coton ; un mètre de mèche pèse 668 milligrammes. La valeur éclairante de la bougie se règle d'après la hauteur de la flamme ; l'unité correspond à une flamme de 50 millimètres de hauteur.

Le point de fusion de la paraffine est assez variable et oscille entre 55° et 65° ; il peut même atteindre 80° et descendre à 44°. Ces variations du point de fusion obligent les fabricants à ajouter, dans certains cas, de 10 à 15 p. 100 de stéarine. Il faut donc, pour avoir une bougie constante, être assuré que sa composition correspond bien aux conditions de pureté mentionnées plus haut.

Bougie de Munich.

83. La bougie de Munich est conforme au type des bougies annexées au traité passé entre la ville de Munich et la compagnie du gaz. Ce sont des bougies stéariques ; leur forme est légèrement conique : $20^{mm},5$ de diamètre en haut et 23 millimètres à la base ; elles ont 31 centimètres de longueur et pèsent $108^{gr},9$ en moyenne ; la mèche est formée de 50 brins. Elles doivent consommer $10^{gr},2$ à $10^{gr},6$ de stéarine à l'heure, sans fumer et sans avoir besoin d'être mouchées ; la hauteur de la flamme est de 56 millimètres.

Variations de l'intensité lumineuse de la bougie avec la hauteur de la flamme et avec la consommation de la matière combustible.

84. La consommation de la bougie n'est pas suffisante pour caractériser son intensité lumineuse ; il faut aussi indiquer la hauteur de la flamme. L'emploi des bougies exige le maintien de la flamme à sa hauteur normale ; ce résultat s'obtient en nettoyant la mèche, à intervalles

assez rapprochés pour que la flamme conserve sa hauteur normale pendant la durée des mesures; car les variations de cette hauteur normale sont excessivement lentes lorsque la mèche a atteint son régime normal peu après avoir été nettoyée.

Ce procédé produisant une perturbation dans la combustion de la bougie, il serait préférable d'attendre tranquillement que la flamme arrive à sa hauteur normale; mais l'attente serait en général trop longue et l'on perdrait ainsi beaucoup de temps, la hauteur normale adoptée pour les bougies ne correspondant pas exactement à la hauteur de la flamme libre.

M. Kruss, par exemple, a trouvé avec un certain nombre de bougies les résultats indiqués dans le tableau ci-après (1).

	LIMITES DE LA HAUTEUR de la flamme.	HAUTEUR MOYENNE de la flamme.	ÉCART MOYEN de la MOYENNE.	SOMME DES VARIATIONS successives dans la hauteur de la flamme.
	Bougies stéariques de Munich. Hauteur prescrite 52 mm.			
N° 1	53 à 60mm	55,09mm	±1,07	58mm
N° 2	51 57	54,2	±1,02	50
N° 3	51 59	55,15	±1,27	49
N° 4	49 54	50,65	±0,93	41
Tot. ou moy	49 à 60mm	54,0mm	±1,93	198mm
	Bougies allemandes (Vereinskerze). Hauteur prescrite 50 mm.			
N° 1	51 à 63mm	54,0mm	±1,35	63mm
N° 2	49 56	52,5	±1,52	61
N° 3	47 55	50,8	±1,62	62
N° 4	50 60	55,3	±1,73	90
Tot. ou moy	47 à 63mm	53,1mm	±1,98	276mm
	Bougies anglaises de blanc de baleine. Hauteur prescrite 44 mm.			
N° 1	46 à 52mm	49,8mm	±1,20	36mm
N° 2	46 50	47,5	±0,92	41
N° 3	45 50	47,4	±0,75	39
N° 4	44 49	45,5	±0,83	41
Tot. ou moy	44 à 52mm	47,67mm	±1,57	157mm

Ces résultats montrent quelles sont les différences qui existent entre

(1) *Journal für Gasbeleuchtung*, 1883, p. 511.

la hauteur de flamme prescrite et celle que l'on obtient en réalité ; pour les bougies stéariques, il se présente, le plus souvent, des hauteurs de flamme comprises entre 54 et 56 millimètres, pour les bougies de paraffine entre 52 et 54 millimètres, et pour les bougies de blanc de baleine entre 47 et 48 millimètres.

Les chiffres de la première colonne indiquent aussi que les bougies de blanc de baleine présentent, entre elles, des différences plus faibles que les autres; ceux de la quatrième fournissent, par contre, des renseignements sur l'importance des variations de la hauteur de la flamme et sur leur régularité. On voit ainsi que les bougies anglaises au spermaceti sont de beaucoup supérieures aux deux autres, pour la régularité et le peu d'importance des variations de chaque bougie. Des mesures faites à la station électro-technique de Munich, sous la direction de M. Voit, confirment les conclusions de M. Krüss.

Ces conclusions démontrent clairement qu'il est nécessaire de moucher la mèche pour obtenir la hauteur de flamme normale.

Voici en outre les résultats obtenus par plusieurs observateurs sur les valeurs moyennes et les variations de la hauteur de la flamme de diverses bougies.

Hauteurs moyennes de la flamme.

	Rudorff.	Schiele.	Commission allemande.	Kruss.	Monnier.	Voit.
Bougie stéarique.....	56,0mm	50,3mm	60,8mm	54,0mm	55,0mm	59,3mm
— de paraffine....	50 ,0	50 ,0	51 ,2	53 ,1	50 ,8	50 ,4
— de blanc de baleine.....	52 ,2	52 ,0	»	47 ,7	46 ,0	44 ,8

Variations dans la hauteur de la flamme.

	Rudorff.	Schiele.	Commission allemande.	Kruss.	Voit.
Bougie stéarique.....	5 p. 100	8 p. 100	35 p. 100	20 p. 100	5 p. 100
— de paraffine.....	8 —	20 —	35 —	30 —	4 —
— de blanc de baleine.	7 —	17 —		17 —	3 —

On a fait à la station électro-technique de Munich des mesures pour déterminer la variation de l'intensité lumineuse avec la hauteur de la flamme ; on a essayé, en outre, d'exprimer cette intensité lumineuse en fonction de la hauteur H, par la formule

$$I = a + bH.$$

Les résultats obtenus sont donnés ci-dessous ; ils sont très intéressants, mais les mesures sont trop peu nombreuses pour en tirer des conclusions absolues.

	Hauteur de la flamme.	Nombre des mesures.	Formule exprimant l'intensité lumineuse.
Bougie de Munich.	47-55	87	$I = 0{,}0068 + 0{,}0192H \pm 0{,}035$
	42-62	149	$= 0{,}0120 + 0{,}0190H \pm 0{,}064$
— allemande	39-53	197	$I = -0{,}0300 + 0{,}0206H \pm 0{,}058$
	42-57	138	$= +0{,}0350 + 0{,}0193H \pm 0{,}043$
— anglaise	32-52	119	$I = 0{,}0077 + 0{,}0223H \pm 0{,}050$
	32-49	81	$= 0{,}0121 + 0{,}0222H \pm 0{,}082$

Mesure de la hauteur de la flamme.

85. La hauteur de la flamme étant un élément si important, il faut pouvoir la mesurer facilement.

Le mesurage direct de la hauteur de la flamme à l'aide du compas n'est guère praticable, à cause de la proximité de l'observateur et du contact de l'instrument de mesure. L'emploi du cathétimètre donne d'excellents résultats; mais cet instrument est réservé aux travaux d'un laboratoire de précision.

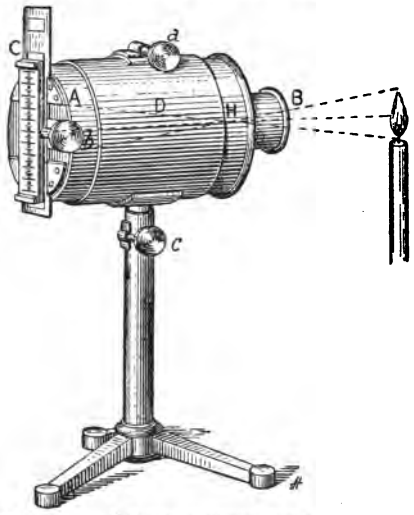


Fig. 41. — Échelle optique pour la mesure de la hauteur d'une flamme.

On peut mesurer cette hauteur en plaçant derrière la bougie une échelle divisée, et en observant avec une lunette. M. Kruss a construit, sur ce principe, l'appareil suivant (1) qui donne de bons résultats (fig. 41).

A l'une des extrémités du tube A se trouve l'objectif achromatique B, tandis que l'autre extrémité est munie d'une tige de verre divisée C.

La distance du foyer H de l'objectif à l'échelle divisée doit être égale au double de la distance focale de l'objectif; le mouvement longitudinal de A est commandé par la vis *a*, le déplacement en hauteur de l'échelle de verre par la vis *b*.

Pour faire une mesure, on place l'appareil de manière que son objectif soit à la même distance de la bougie que de l'échelle divisée; on règle ensuite par les vis *a* et *b* l'image de la bougie, jusqu'à ce qu'elle soit visible avec netteté sur l'échelle de verre. A ce moment, l'image de la flamme est égale à l'original et sa hauteur se lit directement sur la division.

(1) *Journal für Gasbeleuchtung*, 1883, p. 717.

La mesure de la hauteur de la flamme de la bougie comporte difficilement une grande précision à cause de son irrégularité. On ne peut pas toujours voir le bord inférieur de la flamme; ce bord, de couleur bleuâtre, est souvent caché par les bords du godet de paraffine ou de stéarine qui se forme autour de la mèche. En outre, il est rarement à la même hauteur sur toute l'étendue de la flamme. Enfin l'extrémité supérieure de la flamme présente généralement trois pointes surtout lorsque la hauteur est un peu considérable; la pointe du milieu est plus forte et plus longue que les pointes latérales; mais, très souvent, une de celles-ci file, surtout au voisinage d'une hauteur de flamme de 50 millimètres. Les mesures sont alors impossibles.

Mesure de la consommation des bougies.

86. On prescrit, en général, pour les bougies normales, une consommation horaire déterminée; la hauteur de la flamme joue un rôle encore plus important; en effet, il ne peut être question d'une consommation de matière fixe que si la bougie brûle librement et d'une manière uniforme.

Or, dans toute observation photométrique, il faut moucher la bougie; à chaque opération de ce genre, sa consommation est changée, en sorte que la hauteur de la flamme, dont on peut suivre la marche, doit être l'élément caractéristique de l'intensité lumineuse de la bougie et non pas sa consommation qui est modifiée à chaque nettoyage de la mèche.

Voici quelques chiffres donnés par M. Kruss sur la consommation de diverses bougies brûlant librement puis nettoyées à intervalles réguliers.

	Brûlant librement.	Nettoyées.
Bougies de stéarine	10gr,20	8gr,78
— *de paraffine*	7 ,34	7 ,61
— *de blanc de baleine*	7 ,265	7 ,45

La consommation de la matière peut être mesurée à l'aide de l'appareil de Deleuil employé pour la lampe Carcel. Voici cependant (fig. 42) la description d'une balance particulière (1) construite par M. Kruss et adaptée spécialement au contrôle de la consommation des bougies.

Les bras de la balance sont dans le rapport de 1 à 2; les deux bougies qui servent généralement comme étalon double, afin de diminuer les variations de l'intensité lumineuse, sont placées à l'extrémité du bras le plus court, de façon à diminuer d'autant le déplacement vertical de la flamme pendant la comparaison. Le double chandelier A peut être déplacé verticalement entre des limites étendues. La caisse C renferme un élément Leclanché dont l'un des pôles est relié à travers l'électro-

(1) *Journal für Gasbeleuchtung*, 1885, p. 345.

aimant de la sonnerie G à l'index Z; l'autre pôle est en communication avec une petite tige H qui, lorsqu'elle est en contact avec l'index Z, ferme le circuit de la pile, ce qui actionne la sonnerie. Le mode d'emploi de cet appareil est le même que celui de la balance de Deleuil.

Un autre appareil de contrôle de la consommation d'une bougie a été employé fréquemment, entre autres par M. Monnier. C'est l'aéromètre d'Elster, dont la construction est bien connue.

Pour faire une mesure, lorsque la bougie a pris son régime normal,

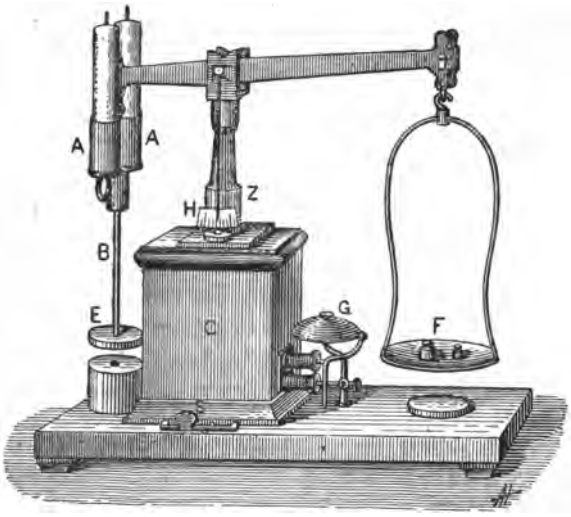


Fig. 42. — Balance de consommation des bougies.

on charge le plateau jusqu'à ce que l'aréomètre porte sur le fond du vase; la bougie, en brûlant, devient plus légère, et l'aréomètre s'élève; au moment où il passe sur le zéro de l'échelle, on fait partir le compteur à secondes et on laisse monter l'aréomètre en notant de minute en minute la position de l'index, ce qui permet de vérifier si la consommation de la bougie est régulière.

Point de fusion de la stéarine.

87. La connaissance de la hauteur de la flamme, combinée avec la consommation horaire de la bougie, permet de ramener l'intensité lumineuse à sa valeur normale. Ces deux points, le premier surtout, sont des plus importants. Un troisième n'est cependant pas à négliger : c'est le degré de pureté de la matière dont est formée la bougie. A cet égard, le point de fusion et de solidification fournit une base précieuse pour contrôler la valeur de la matière de la bougie, car la présence de corps étrangers modifie considérablement cette température.

Voici les valeurs du point de fusion des bougies usuelles, d'après les mesures de MM. Kruss et Rudorff ; les chiffres ci-dessous sont la moyenne d'un nombre très considérable de mesures.

	Kruss.	Rudorff.
Bougie de stéarine de Munich.....	54°,0	53°,0 à 56°,6
— allemande de paraffine.....	53°,7	49°,0 à 54°,0
— anglaise de blanc de baleine.....	43°,7	43°,5 à 44°,3

La méthode la plus usitée pour obtenir le point de fusion des matières grasses consiste à enfermer la substance à étudier dans un tube capillaire, puis à chauffer au bain-marie, en mesurant la température de celui-ci.

On considère comme point de fusion la température à partir de laquelle la graisse devient transparente ou se détache du tuyau et se met en mouvement. Ce procédé n'est pas exact.

Une autre méthode plus rigoureuse a été proposée par M. Loewe. Une sonnerie électrique et un bain de mercure sont placés dans le circuit d'une pile; un thermomètre et deux fils de platine sont enfoncés dans le mercure; un des fils, terminé en boule, est enduit d'une mince couche de substance grasse, et le circuit est établi dès que le point de fusion est atteint.

Intensité lumineuse des bougies étalons.

88. Il est difficile d'exprimer numériquement l'intensité lumineuse relative des diverses bougies : autant d'observateurs, autant de valeurs différentes. Une des causes principales de ces divergences doit être cherchée dans le peu de constance de l'intensité lumineuse de ces étalons photométriques.

Nous avons déjà dit que Schwendler a constaté des variations d'intensité lumineuse de 40 p. 100; il faut croire cependant qu'il ne tenait pas compte de la hauteur de la flamme ni de la dépense de la bougie.

A l'autre extrême se place M. Kruss qui prétend avoir pu maintenir l'invariabilité de la lumière émise par la bougie à 3 p. 100 près; ce chiffre est évidemment trop favorable pour les essais industriels où l'on ne peut guère observer toutes les précautions minutieuses suivies par le savant spécialiste allemand. Mentionnons encore les résultats d'autres observateurs.

M. Dibdin, à la suite de recherches étendues sur les étalons lumineux, prétend, dans son rapport au *Metropolitan Board of Works*, de Londres, que les bougies ne donnent qu'accidentellement des résultats uniformes. Ainsi, sur 454 mesures faites avec des bougies, 154 soit 34 p. 100 seulement ont donné des résultats différant de moins de 10 p. 100 de la moyenne

MM. Heisch et Hartley, dans une étude sur le même sujet, ont constaté des différences de 1,3 p. 100 à 16 p. 100 de la moyenne, la différence moyenne étant 7 p. 100 environ. D'autre part, M. Foucart a trouvé que, dans ses expériences, l'intensité de la bougie de l'Étoile variait de 9,9 p. 100 en plus de la moyenne et de 13,9 en moins, la variation totale étant de 23,8 p. 100.

Une commission anglaise dont faisait partie M. Williamson signale, dans son rapport au Board of Trade, le fait que des bougies prises dans deux paquets différents ou même dans le même paquet provenant de la même fabrique peuvent donner des écarts de 14 à 15 p. 100.

On voit donc qu'il n'est guère possible, dans ces conditions, de donner des chiffres exacts pour la valeur relative des diverses bougies. Aussi nous bornerons-nous à indiquer sommairement dans le tableau suivant les valeurs relatives obtenues par différents observateurs.

Hauteur de flamme de 44mm,5.

	Rüdorff.	Bühe.	Kruss.	Monnier.
Bougie de Munich	100,0	100,0	100,0	100,0
— allemande	107,9	106,4	106,0	87,5
— anglaise	108,7	108,7	104,5	78,4

Hauteur de flamme normale.

	Schilling.	Kruss.	Voit.	Schiele.
Bougie de Munich	100,0	100,0	100,0	100
— allemande	88,7	97,6	96,5	92
— anglaise	90,7	85,8	94,4	

Nous donnons enfin pour terminer les résultats obtenus par M. Monnier sur la valeur de l'intensité lumineuse des bougies usuelles avec indication de la hauteur de la flamme et de la consommation horaire ; tous les nombres sont exprimés en fonction de la lampe Carcel normale.

	Hauteur de la flamme.	Consommation moy. horaire.	Valeur moy. en carcel.
Bougie anglaise	46,0mm	7,8gr	0,120
— allemande	50,0	7,5	0,134
— de Munich	55,0	10,4	0,153
— de l'Étoile	52,4	10,0	0,134

LES LAMPES A PÉTROLE.

89. La mesure de l'intensité des sources lumineuses très intenses ne peut guère être faite par comparaison directe avec l'étalon, bougie ou lampe Carcel, à cause de la grande différence des intensités ; il est avantageux d'employer un étalon photométrique intermédiaire dont la constance soit suffisante pendant la durée des essais et qui donne une intensité lumineuse moyenne entre celle de l'étalon et celle de la source que l'on étudie.

Au premier rang des sources de lumière qui réalisent les conditions exigées d'un étalon photométrique intermédiaire, il faut citer les lampes à pétrole.

Les lampes à pétrole à mèche ronde sont aujourd'hui universellement répandues. Le système le plus simple est celui qui est identique à la lampe Carcel : mèche ronde avec double courant d'air et tube de verre à étranglement.

Nous ne pouvons pas donner la description détaillée des principaux types de lampes à pétrole (1) ; il en existe une grande variété. Il faut reconnaître toutefois que la plupart d'entre eux sont établis sans tenir suffisamment compte des principes rationnels qui sont à la base de la construction des lampes qui doivent donner une lumière fixe et intense, avec le minimum de consommation de pétrole.

Parmi les lampes à mèche ronde il faut mentionner celles qui possèdent un disque central destiné à élargir la flamme et à activer la combustion ; le tube ne doit pas avoir d'étranglement pour obtenir un rendement lumineux maximum.

La lampe à pétrole a, sur la lampe Carcel, plusieurs avantages. D'abord elle ne possède pas de pompe destinée à amener l'huile sur la mèche ; le pétrole étant très fluide, monte dans celle-ci par capillarité avec une rapidité suffisante.

On a trouvé, par exemple, qu'une huile minérale ayant une densité de 0,85, monte dans la mèche avec une rapidité suffisante pour alimenter une flamme normale, même lorsque la hauteur ascensionnelle atteint 200 millimètres. En outre, la flamme est située tout à fait au-dessus de la mèche, en sorte que celle-ci se carbonise beaucoup plus lentement ; il n'est pas nécessaire de la remplacer à chaque mesure, il suffit de la nettoyer en l'essuyant avec un chiffon, sans la couper.

Il résulte de mesures précises que l'augmentation de la densité du pétrole qui se produit après que la lampe a brûlé pendant quelque temps n'a pas d'influence sensible sur l'intensité lumineuse.

La diminution de celle-ci dépend surtout des conditions sous lesquelles la lampe fonctionne. Au moment de l'allumage, le pétrole se trouve près de la flamme et la mèche n'est pas encore carbonisée ; l'huile et la lampe sont encore froides. Au bout de quatre à cinq heures, le niveau de l'huile a baissé considérablement, mais sa température et celle de la lampe ont augmenté, ce qui est une compensation. Si l'on représente graphiquement la marche de l'intensité lumimineuse, avec le temps, on obtient en général une courbe qui monte au commencement et descend ensuite très lentement.

Au Congrès international des électriciens de 1881, M. Wiedemann a

(1) Voir *Dingler's Journal*, vol. CCLV, p. 34; vol. CCLXIII, p. 374; vol. CCLXVII, p. 145 et 265.

préconisé la lampe à pétrole pour les mesures photométriques ; en général, tous ceux qui l'ont utilisée comme étalon intermédiaire n'ont eu qu'à s'en féliciter.

Ainsi, M. Hefner von Alteneck recommande chaleureusement l'usage de la lampe à pétrole à bec rond ou à bec intensif ; les mesures photométriques effectuées au laboratoire de la maison Siemens et Halske ont montré que cet étalon offre une constance bien suffisante pour la plupart des mesures industrielles ; la qualité du pétrole employé influe très peu sur les variations de l'intensité lumineuse ; l'intensité intrinsèque augmente par contre avec la fluidité du liquide.

Par suite des règlements de police sur les huiles minérales, les pétroles raffinés que l'on trouve dans le commerce sont de qualité assez uniforme. Comme, d'ailleurs, on compare, lors de chaque mesure, l'intensité de la lampe à pétrole avec l'étalon photométrique, la composition du pétrole n'a d'influence qu'au point de vue de la constance de la lumière émise.

M. Kruss a comparé entre elles deux lampes à bec rond ordinaire, d'égales dimensions ; dans l'espace d'une heure, le plus grand écart des intensités lumineuses de ces lampes a été de 1,70 p. 100 et l'écart moyen de 0,5 p. 100.

M. Liebenthal a obtenu des résultats moins satisfaisants en comparant une lampe à pétrole avec la lampe à acétate d'amyle de Hefner-Alteneck ; l'erreur moyenne de chaque observation a été trouvée de 3 p. 100 environ. Il est cependant possible que la plus grande partie de ces écarts doive être attribuée aux variations de l'étalon Hefner.

Les remarques relatives à l'influence de la hauteur de la flamme sur l'intensité lumineuse des bougies et de la lampe Carcel s'appliquent évidemment aux lampes à pétrole. Cependant les variations de hauteur de la flamme sont très faibles dans ces dernières.

Il faut, en général, donner à la flamme la hauteur maxima qui précède le moment où la lampe file ; dans ce cas, les variations de hauteur de la flamme sont le moins sensibles et la lampe brûle dans les meilleures conditions.

Il est d'ailleurs facile de se mettre à l'abri des variations de l'intensité lumineuse produites par les variations de hauteur de la flamme. La lampe à pétrole sert uniquement comme étalon intermédiaire, et son intensité lumineuse absolue n'a aucune importance, au point de vue pratique. C'est pourquoi on peut employer très avantageusement une espèce d'écran dans le genre de celui de Methwen (93), qui ne laisse voir que la partie centrale seulement de la flamme de la lampe. Les variations dans la hauteur de la flamme n'exercent alors qu'une influence insensible sur l'intensité lumineuse de l'étalon. L'écran le plus simple consiste en un tube métallique noirci, muni d'une ouverture de dimensions détermi-

nées, qu'on place sur la lampe, coaxialement avec le tube ordinaire en verre. On choisit les dimensions de l'ouverture du tube opaque de manière à ne laisser passer que les rayons lumineux émis par la partie centrale de la flamme, peu affectée par les variations de hauteur.

Voici pour terminer quelques données sur l'intensité lumineuse de plusieurs lampes à pétrole, données que nous empruntons à un travail de M. Heim (1) sur les appareils d'éclairage usuels et à une étude de MM. Dolini et Alibegow (2) sur les lampes alimentées par les huiles minérales du Caucase (*Kérosine* de Hobel, densité 0,822 à 25°; huile de naphte de Ragosin, densité 0,858 à 15°).

	Diamètre du porte-mèche en millim.	Intensité en bougies normales.	Consommation d'huile par heure et par bougie.
Brûleur rond ordinaire.....	25	16,1	3gr,27
— Victoria à disque central ..	30	19,2	3 ,30
— — — ...	62	67,3	3 ,40
— Cosmos..... ..	30	22,9	3 ,70

Les lampes ci-dessus ont consommé du pétrole raffiné américain (densité 0,796 à 18°).

Parmi les meilleurs brûleurs à disque central, il faut citer le *Mondbrenner* de Schuster et Baer, dont le porte-mèche a quatorze lignes; alimenté avec de la kérosine, il donne une intensité lumineuse de 14,88 bougies pour une consommation horaire de 3gr,56 par bougie.

Ce brûleur possède un disque central, et à la base du porte-mèche, des canaux latéraux destinés à refroidir la construction métallique. La plus grande variation d'intensité observée avec cette lampe a été de 1,32 bougies (14,36 à 15,68 bougies).

LA LAMPE HEFNER A ACÉTATE D'AMYLE.

Lampes à benzine.

90. Dans la lampe Carcel comme dans les bougies, la mèche est une des causes principales des irrégularités de la flamme. Il faut donc la supprimer. Mais, pour obtenir une flamme étalon sans mèche, ou dans laquelle l'influence de celle-ci soit réduite à un minimum, il faut avoir recours à des liquides facilement combustibles qui se volatilisent sous l'action de la chaleur de la flamme, et brûlent sous forme de vapeur, sans avoir besoin comme l'huile de colza, le pétrole, etc., de l'action directe de la flamme sur la mèche saturée de liquide.

Des lampes à benzine ou à ligroïne ont été employées comme étalons photométriques secondaires. Ainsi, en 1877, M. Eitner (3) a préconisé

(1) *La Lumière électrique*, vol. XXVI, p. 220.
(2) *Dingler's Journal*, vol. CCLXVII, p. 265.
(3) *Centralblatt für Electr.*, 1885, p. 711.

l'emploi d'une petite lampe alimentée par la benzine et qui a donné des résultats satisfaisants; la mèche ronde et compacte est placée dans un tube très mince en laiton et le dépasse de 10 millimètres environ ; celui-ci est mobile à l'aide d'une crémaillère dans un second tube qui sert à limiter la flamme; on amène la mèche, qui a 7,5 millimètres de diamètre, au niveau du tube extérieur, et la combustion de la benzine s'effectue sans trop charbonner la mèche. Une mire en platine sert à limiter la hauteur de la flamme. L'intensité lumineuse de cette lampe est d'une bougie environ. Les lampes à benzine ordinaires peuvent rendre d'excellents services dans certaines études photométriques.

On trouve par exemple dans le commerce de petites lampes à benzine ou à essence qui donnent de bons résultats comme étalons photométriques, ainsi que M. Uppenborn (1) l'a démontré.

A l'aide d'une lame de tôle munie d'une entaille, on place le verre de façon que le bord supérieur soit à une hauteur constante et déterminée au-dessus du porte-mèche (45 mm. par exemple). Le bord du verre sert alors à viser l'extrémité de la flamme et à maintenir sa hauteur constante à l'aide de la crémaillère.

La hauteur de la flamme étant maintenue constante, ces petites lampes fournissent une lumière d'une constance remarquable ; il suffit de les comparer de temps en temps avec un des étalons usuels.

La lampe de M. Eitner, ainsi que celles qui sont fondées sur la combustion des essences minérales, sont toutes affectées de la même cause d'erreur. Ces liquides ne sont pas des composés chimiques bien déterminés, mais des mélanges de différentes substances ayant un point d'ébullition différent et une composition variable ; on ne peut pas les obtenir dans des conditions toujours identiques. Ils ont, en outre, le désavantage de ne pas brûler uniformément, la combustion se faisant d'abord aux dépens des matières les plus volatiles; il reste finalement un produit d'une volatilisation difficile qui exige d'autres conditions de combustion pour fournir la même flamme.

Ces considérations et un grand nombre d'essais sur divers liquides ont engagé M. Hefner-Alteneck (2) à prendre comme combustible l'acétate d'amyle. Ce liquide est limpide et possède une odeur agréable très intense. On peut l'obtenir facilement pur, en distillant de l'acide acétique cristallisable ou un acétate avec de l'acide sulfurique et de l'alcool amylique. On le fabrique en grand pour la parfumerie; son point d'ébullition très constant est à 138°, et son prix est peu élevé.

(1) *Lumière électrique*, vol. XXVIII, p. 532.

(2) *Lumière électrique*, vol. X, p. 501; *Electr. Zeitsch.*, vol. IV, 1883; vol. III, p. 20, 1884.

Lampe Hefner.

91. La lampe de Hefner-Alteneck est une simple lampe à essence (fig. 43 et 43 *bis*) ; l'inventeur a conservé la mèche parce que la lampe se manipule plus facilement et que, d'ailleurs, elle ne charbonne pas en brûlant l'acétate d'amyle; elle a, en effet, simplement pour but d'aspirer le liquide qui se dégage en vapeur dès que la température atteint 138°.

Le porte-mèche est un tube en maillechort de 8 millimètres de diamètre intérieur, de 0,15 millimètre d'épaisseur, et de 25 millimètres de hauteur.

L'intensité normale de la lampe est déterminée par la hauteur de la flamme ; cette hauteur normale est de 40 millimètres, ou cinq fois le diamètre, mesurée à partir du bord du porte-mèche; elle se règle en élevant plus ou moins la mèche à l'intérieur de celui-ci. La hauteur normale est repérée à l'aide d'une mire adaptée à la lampe.

La flamme doit brûler à l'air libre sans cheminée de verre; cependant on fait usage quelquefois d'un tube en verre droit, de 88 millimètres de hauteur et de 55 millimètres de diamètre; dans ces conditions, l'intensité lumineuse de la flamme de 40 millimètres diminue de 2 p. 100.

La mèche doit être construite avec beaucoup de soin ; elle doit remplir exactement le tube en maillechort sans être comprimée; on peut la fabriquer soi-même en disposant parallèlement des filaments de coton ordinaires, jusqu'à ce qu'on ait atteint le diamètre requis. Il n'est pas avantageux d'employer, comme on l'a proposé, une mèche dont l'extrémité soit en fils d'amiante; la complication qui en résulte ne compense pas l'uniformité un peu plus grande de la lumière ainsi obtenue et, en outre, il n'est pas prouvé que l'intensité de celle-ci ne soit pas altérée ; d'ailleurs, l'amiante ne dispense nullement de couper la mèche, de temps à autre.

La hauteur de flamme normale de 40 millimètres a été adoptée, parce que la lampe donne alors une lumière égale à celle d'une bougie anglaise dont la flamme a 43 millimètres de hauteur. Cependant M. Bunte (1) a trouvé que l'unité von Hefner-Alteneck correspond à la bougie anglaise avec flamme de 45 millimètres de hauteur, et M. Liebenthal a conclu de plus de 200 comparaisons que la flamme de la lampe à acétate d'amyle de 37 millimètres de hauteur a la même intensité lumineuse que celle de la bougie anglaise de 43,2 millimètres. Ces différences ne sont pas exagérées si l'on tient compte du peu d'uniformité de ces deux étalons lumineux et des difficultés de mesurer exactement la hauteur d'une flamme.

Des comparaisons faites avec le plus grand soin avec des appareils

(1) *Journal für Gasbe'euchtung*, 1885, p. 796.

perfectionnés ont été effectuées par la commission des étalons photométriques de la Société allemande des ingénieurs du gaz et par MM. Lummer et Brodhun à l'Institut physico-technique de Berlin.

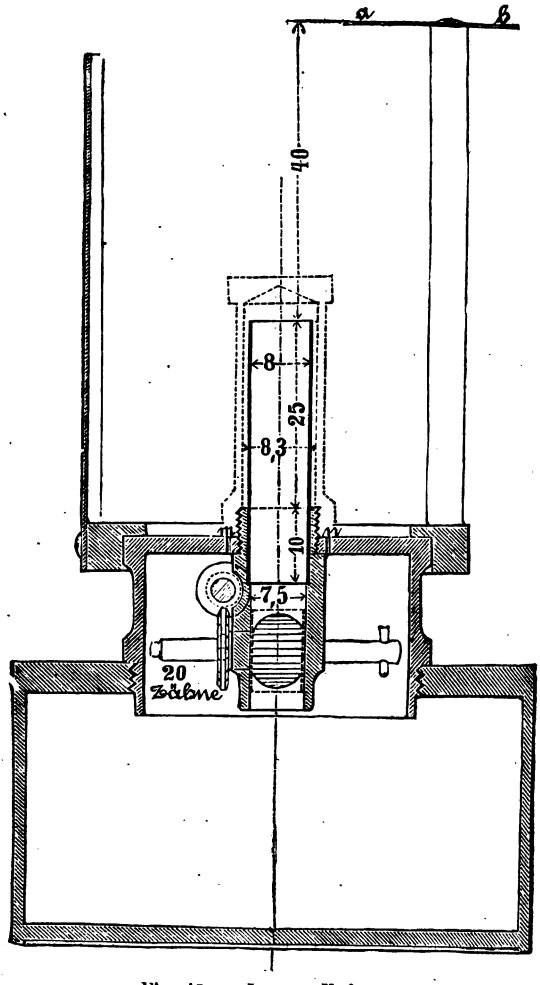


Fig. 43. — Lampe Hefner.

Voici les résultats obtenus, qui sont les moyennes d'un grand nombre de mesures faites avec des lampes et des bougies différentes :

1 bougie allemande vaut.....	1,223	Hefner (com. all.).
	1,162	— (Lummer).
1 — anglaise vaut.....	1,129	— (com. all.).

La différence de 6 p. 100 entre les résultats de la commission et ceux

de MM. Lummer et Brodhun montre bien les difficultés de la réalisation des étalons photométriques à combustion libre.

L'intensité de l'étalon Hefner est trop faible, maintenant surtout que l'on tend toujours plus à employer des foyers lumineux intenses; la couleur de la flamme est un peu rouge par suite de sa température relativement peu élevée. C'est de tous les étalons lumineux le plus riche en

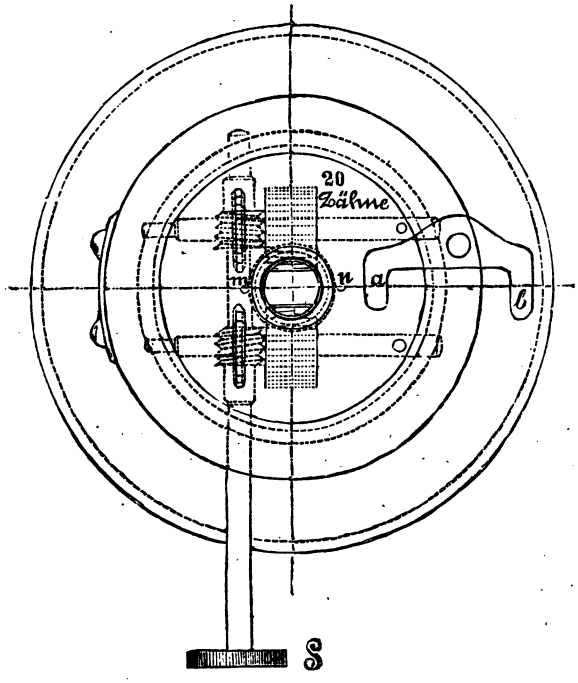


Fig. 43 *bis*. — Lampe Hefner.

rayons rouges. A ce point de vue encore, on ne peut pas l'utiliser avantageusement pour la photométrie des foyers à incandescence ou à arc.

Variations de l'étalon Hefner.

92. Le seul avantage de la lampe à acétate d'amyle doit être cherché dans sa grande constance; sur ce point-là tous ceux qui l'ont employé sont d'accord. Ainsi, M. Liebenthal a constaté, à la suite d'un grand nombre de mesures, que l'erreur moyenne d'une observation varie entre 0,5 et 1,5 p. 100. Sur 225 observations que M. Dibdin a faites avec la lampe Hefner, le résultat a différé de la moyenne d'une quantité inférieure à 1 p. 100 dans 206, dans 90 p. 100 des mesures.

Les causes qui influent sur la valeur de l'étalon à acétate d'amyle pro-

viennent surtout de l'état de l'air ambiant. L'air vicié d'une salle a une influence sensible sur le pouvoir éclairant de la lampe; on le remarque facilement par comparaison avec une lampe à incandescence. L'influence des variations de la pression barométrique en un lieu donné n'a pas pu être constatée; elle doit par contre être sensible en transportant la lampe dans des lieux élevés; cette influence est d'ailleurs sensible avec tous les étalons basés sur la combustion.

La température du lieu d'observation n'a pas d'influence sur la valeur intrinsèque de l'étalon lumineux; on remarque seulement que les variations de la flamme sont un peu plus considérables lorsque la température est un peu basse.

D'après la définition de M. Hefner-Alteneck les mesures peuvent commencer déjà dix minutes après l'allumage; mais ce laps de temps est un peu court et il vaut mieux attendre quarante-cinq minutes au moins (1).

Le pouvoir éclairant de la lampe à acétate d'amyle varie beaucoup avec la hauteur de la flamme; celle-ci est effilée, très mobile, et les mesures de sa hauteur sont difficiles. C'est là un des grands inconvénients de l'étalon Hefner. Il faut dans les mesures photométriques qu'un observateur spécial indique le moment où la hauteur normale de la flamme est atteinte.

Le procédé de mesure le plus exact repose sur l'emploi du cathétomètre, mais on ne peut s'arrêter à cette solution que dans les recherches scientifiques de laboratoire. Dans ces conditions, on peut mesurer la hauteur de la flamme avec une exactitude moyenne de 0,2 millimètre. Il faut cependant beaucoup d'attention pour arriver à ce résultat, à cause de l'influence du bord de la flamme.

La hauteur de la flamme mesurée à l'aide de la mire adaptée à la lampe est affectée d'une erreur moyenne de 0,5 millimètre; des écarts de 1 millimètre sont cependant possibles. On peut facilement adapter à la lampe Hefner un appareil pour mesurer la hauteur de la flamme, analogue à celui que nous avons décrit en parlant des bougies (2).

La lampe est munie d'un écran latéral qui supporte à sa partie supérieure un tube fermé d'un côté par une lentille achromatique; un second tube qui peut glisser sur le premier porte une glace en verre dépoli sur laquelle est gravée une division millimétrique; le trait 40 de cette division correspond au centre de la lentille et se trouve à 40 millimètres au-dessus de l'extrémité du porte-mèche : l'image de la flamme se projetant sur cette glace, on peut en suivre les variations sans difficulté. Ce procédé permet de mesurer la hauteur de la flamme avec une erreur moyenne de 0,3 millimètre, correspondant ainsi à une erreur de 0,8 p. 100 dans l'intensité lumineuse. Cette erreur moyenne de 0,2 à 0,3 millimètre est

(1) *Journal für Gasbeleuchtung*, 1890, p. 33.
(2) *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 1890, p. 133.

relative aux mesures d'un seul et même observateur. Les résultats de deux observateurs sont moins (1) concordants et diffèrent très souvent de 0,5 à 0,6 millimètre.

M. Liebenthal (2) a trouvé que l'intensité lumineuse de la lampe à acétate d'amyle est donnée, pour une hauteur de flamme inférieure à 40 millimètres, par la formule

$$I = I - 0{,}038(40 - h).$$

Pour les hauteurs supérieures à 50 millimètres, la formule devient :

$$I = I + 0{,}025(h - 40).$$

Au-dessous de 40 millimètres, l'intensité lumineuse augmente plus rapidement que la hauteur; au-dessus, par contre, l'augmentation est sensiblement proportionnelle.

Les dimensions du porte-mèche indiquées par M. von Hefner-Alteneck correspondent à l'intensité lumineuse maximum, car M. Liebenthal a trouvé une diminution de 1 p. 100 environ, en augmentant ou en diminuant de 2 millimètres le diamètre du tube en maillechort. Quant à la hauteur libre de ce tube, une différence de 1 millimètre produit une variation de 0,2 p. 100 seulement.

Malgré ces résultats favorables, on a constaté que des différences de fabrication produisent des différences considérables dans l'intensité lumineuse de l'étalon Hefner. C'est ainsi que six lampes étalons comparées par une commission spéciale de la Société allemande des ingénieurs du gaz avec le meilleure modèle de l'Institut physico-technique de Berlin ont produit des intensités lumineuses exprimées par les chiffres suivants : 0,987; 0,993; 0,993; 0,965; 1,016; 0,981. Ces nombres présentent des différences de + 1,6 à — 3,5 p. 100. La même commission constata également une différence de 2,9 p. 100 entre les pouvoirs éclairants de deux lampes, construites l'une par Siemens, l'autre par Krüss à Hambourg. Enfin des lampes, de Siemens, de Krüss et de l'Institut physico-technique de Berlin ont donné des différences comprises entre + 8, 9 et — 3,2 p. 100.

Dans ces conditions, il est difficile de l'adopter comme étalon absolu puisqu'un des principaux avantages qu'on revendiquait en sa faveur, la facilité d'une reproduction identique, n'existe pas.

Influence de la pureté de l'acétate d'amyle.

93. L'influence des impuretés de l'acétate d'amyle sur l'intensité lumineuse de l'étalon Hefner a été étudiée avec beaucoup de soin par M. Liebenthal.

(1) *Zeitschr. für Instrumentenkunde*, 1890, p. 131.
(2) *La Lumière électrique*, vol. XXVII, p. 413 et vol. XXXI, p. 113.

On sait que l'acétate d'amyle, $C^7H^{14}O^2$, dont le point d'ébullition est entre 138° et 140°, s'obtient par l'action de l'acide sulfurique sur l'alcool amylique C^5H^2O (point d'ébullition 129° à 133°) et sur du vinaigre (point d'ébullition 117° à 119°). Cet éther renferme très souvent des quantités variables d'alcool amylique, d'acide acétique et d'eau. On peut le purifier par une distillation fractionnée, mais cette longue opération doit être faite avec beaucoup de soin, à cause du peu de différence des points d'ébullition des impuretés.

Si ces impuretés sont considérables, il faut mélanger quatre parties de liquide avec une partie d'une solution concentrée de sel de cuisine additionné d'une faible quantité de magnésie calcinée ; on agite fortement et on renouvelle cette opération plusieurs fois ; on sépare ensuite la solution de sel de cuisine et on agite de nouveau le liquide avec du chlorure de calcium pulvérisé ; il suffit ensuite de rectifier l'acétate d'amyle à une température de 80° environ.

M. Liebenthal a trouvé que les impuretés diminuent le pouvoir éclairant ; pour l'alcool amylique, la diminution est si faible qu'on peut la négliger dans la pratique ; une diminution de 20 p. 100 d'alcool amylique affaiblit le pouvoir éclairant de 1,1 p. 100 seulement. L'acétate d'amyle saturé d'eau donne également un pouvoir éclairant très sensiblement égal à la valeur normale ; la diminution est de 0,5 p. 100. Une diminution de 3 p. 100 du pouvoir éclairant a été constatée avec un échantillon d'acétate d'amyle additionné de 10 p. 100 d'alcool et de 5 p. 100 d'eau, mais cette altération ne se rencontre pas dans la pratique.

Il résulte donc de ces mesures que la composition de l'acétate d'amyle ne fait varier le pouvoiré clairant de la lampe von Hefner, pour une hauteur de 40 millimètres, que dans des limites très restreintes.

L'influence des impuretés est plus considérable sur la stabilité de la flamme. A mesure que les impuretés du liquide augmentent, la flamme devient de moins en moins tranquille et est affectée d'oscillations très faibles qui peuvent cependant, dans certains cas, être perceptibles à l'œil nu. L'instabilité de la flamme peut s'expliquer en admettant que le liquide impur, inaltérable dans un vase fermé, s'altère peu à peu, au fur et à mesure de la combustion ; on s'en aperçoit d'ailleurs à la production de vert de gris et à la carbonisation de la mèche ; cette dernière ne peut alors aspirer régulièrement le liquide.

Il faut donc vérifier avec soin la composition du liquide avant de procéder aux mesures et en cas de doute le soumettre à une distillation spéciale.

Voici le procédé indiqué par M. Bannow (1) pour vérifier la pureté de l'acétate d'amyle.

(1) *Electrotech. Zeitschr.*, 1891, p. 122, 177, 193.

1° La densité du liquide doit être de 0,872 à 0,876 à 15° centigrades (contrôle de l'alcool).

2° Le mélange de deux volumes égaux d'acétate d'amyle et de benzine (ou de sulfure de carbone) doit rester clair et limpide (contrôle de l'alcool amylique ou éthylique hydraté ; l'eau se sépare en gouttelettes sous l'action du sulfure de carbone).

3° En agitant dans un verre gradué 1 centimètre cube d'acétate d'amyle avec 10 centimètres cubes d'alcool à 90 p. 100 et 10 centimètres cubes d'eau, on doit obtenir une solution claire et limpide (contrôle du toluol, etc., non constatés par le second essai).

4° Une goutte d'acétate d'amyle ne doit laisser aucune trace graisseuse après évaporation sur une feuille de papier blanc (contrôle d'huiles de goudron et autres matières grasses).

L'étalon Hefner est adopté en Allemagne par la Société des ingénieurs du gaz et la sanction officielle lui sera prochainement donnée par l'Institut physico-technique de Berlin. On peut se demander, en constatant les nombreuses causes d'erreur de cet étalon lumineux, si le progrès réalisé en remplaçant la bougie par la lampe Hefner est assez grand pour justifier l'introduction de ce nouvel étalon absolu.

L'ÉTALON GIROUD.

91. En 1882, M. Giroud a proposé un nouvel étalon photométrique destiné surtout à la vérification du gaz, mais qui, dans certains cas, peut être utilisé avantageusement dans la photométrie électrique. Cet étalon est basé sur la combustion du gaz dans un bec déterminé, sous une pression constante et bien définie.

MM. Audouin et Bérard (1) ont étudié avec soin les circonstances qui influent sur la lumière émise par un brûleur à gaz et parmi lesquelles il faut citer, outre la composition et la pression du gaz, les dimensions, la forme et la nature du bec employé.

L'étalon de Giroud (2) se compose de deux lumières dont l'une sert à constater la constance d'intensité de l'autre, tout en permettant de mesurer ses variations. Ces deux lumières sont alimentées par le gaz d'éclairage ordinaire qu'on se procure avec autant sinon plus de facilité que l'huile, la stéarine, etc. L'un des deux becs de l'étalon est un bec-bougie à un seul trou de 1 millimètre, l'autre est un bec Argand. Les lumières produites sont entre elles dans le rapport de 1 à 10, et comme elles résultent de la composition d'un même gaz, elles restent dans le même rapport, malgré les variations accidentelles survenues dans la qualité de celui-ci.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, vol. LXV.
(2) *Journal des usines à gaz*, 1881 et 1882.

Tout changement d'intensité propre se manifeste dans l'étalon par un changement dans la surface de la flamme ou dans les dimensions de celle-ci. Il est impossible de constater ce changement de dimensions sur le bec Argand, tandis qu'il est facile à reconnaître et à mesurer avec le bec à un seul trou, dans lequel la moindre altération se reporte d'une manière très sensible sur la longueur de la flamme. Tout se ramène alors au seul mesurage de cette longueur; si elle reste constante, c'est que l'intensité du bec-bougie et par conséquent celle du bec Argand ne se sont pas modifiées; si elle varie, l'amplitude de cette variation donne la mesure de la modification subie par le bec Argand, quel que soit du reste le nombre d'unités que représente le bec.

Bec-bougie étalon de Giroud.

95. M. Giroud a donné au bec-bougie la valeur d'un dixième de carcel, c'est-à-dire la valeur que l'on admet approximativement pour la bougie, et au bec Argand la valeur d'un carcel.

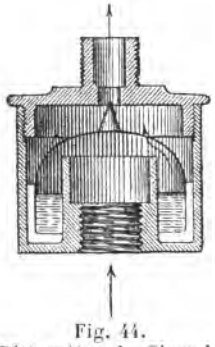


Fig. 44.
Rhéomètre de Giroud.

L'invariabilité de la longueur de la flamme est nécessaire pendant les mesures. Il faut donc que la dépense de gaz soit constante, ce qui nécessite l'emploi d'un jaugeage spécial effectué par le *rhéomètre* de Giroud.

Le rhéomètre est un instrument de jaugeage continu, applicable à l'écoulement de fluides liquides et gazeux. La figure 44 le représente en grandeur d'exécution pour les becs à gaz ordinaires.

Le courant indiqué par les flèches soulève un barrage mobile, dont rien ne doit gêner le mouvement vertical; il est formé pour ce motif par une capsule glissant sans frottement dans un bain de glycérine qui lui sert de lut. Cette capsule est percée d'un orifice qui n'a rien de commun avec celui du bec, et à cet orifice s'établit une vitesse qui n'a rien de commun avec celle du courant. De sorte que l'on peut placer sur le rhéomètre un brûleur quelconque, et même n'en pas mettre du tout, sans que le débit du rhéomètre en soit affecté.

Voici maintenant la description de l'étalon bougie de M. Giroud dont la figure 45 donne la coupe verticale.

Ce n'est en définitive qu'un rhéomètre dont la soupape est sous la capsule C au lieu d'être au-dessus. Le clapet conique de la soupape est soudé par sa base au tube A qui plonge dans le bain de glycérine de la chambre E. La section intérieure de ce tube est exactement égale à celle de l'orifice formant le siège de la soupape conique; la tige qui rattache le cône à la capsule est un petit tube ouvert de part en part. De cette

façon l'organe mobile composé de la capsule, du cône et du tube B, reste suspendu en équilibre sur le courant et ne peut se mouvoir que dans le sens vertical, sous l'action de la pression à laquelle le gaz est soumis; on démontre que cette pression résistante est constante, car elle est donnée par la formule

$$P - P' = \frac{p}{S - s}.$$

P étant la pression du gaz;

P' la contre-pression produite par le brûleur;

p le poids propre de l'organisme mobile complet;

S la surface de la capsule C;

s la section intérieure du tube A.

Lorsque la pression P — P' augmente, la capsule c se soulève, le clapet conique du tube A ferme un peu l'ouverture par laquelle passe alors une moindre quantité de gaz; l'équilibre se rétablit lorsque la pression normale P — P' a été atteinte de nouveau. Le débit ne dépend donc que du diamètre de l'orifice de la capsule C et de la nature du gaz.

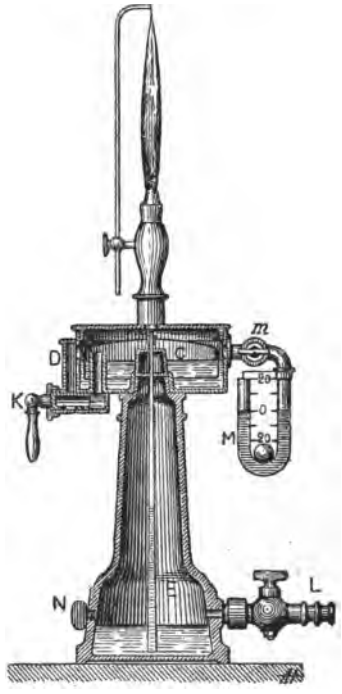


Fig. 45. — Bec-bougie étalon de Giroud.

La mire figurée au dessin n'est qu'une indication; la mesure se prend à partir du brûleur jusqu'à la portion extrême de la flamme, à l'endroit même où la pointe rouge qui la termine cesse d'être visible.

L'orifice rhéométrique percé sur la capsule est d'un diamètre tel qu'il est toujours nécessaire de recourir au robinet K pour obtenir le volume auquel sera due, avec le courant de gaz ordinaire, la hauteur de flamme normale.

Le foyer de combustion est un bec en stéatite donnant l'accès le plus facile à l'air, au point où la flamme prend naissance. L'orifice de ce bec doit avoir 1 millimètre; un jaugeage permet de s'en assurer.

M. Giroud a adopté une longueur de flamme de 67,5 millimètres, pour laquelle le bec-bougie donne exactement une intensité lumineuse de 1/10 de Carcel. Il y a entre la longueur et l'intensité de la flamme du bec à gaz à un seul trou un rapport qui reste constant pour des longueurs comprises entre 45 et 120 millimètres. C'est la même chose que pour la lampe Carcel, où il y a entre le poids d'huile consommé et l'intensité lumi-

neuse un rapport qui reste constant pour les dépenses comprises entre 40 et 44 grammes d'huile à l'heure.

Voici à ce sujet quelques chiffres :

Longueur de la flamme du bec-bougie en millimètres.	Intensité en carcel.
45	0,0505
50	0,0614
60	0,0835
65	0,0945
67,5	0,1000
70	0,1055
75	0,1165
80	0,1275
90	0,1495
100	0,1715
110	0,1935
120	0,2155

La variation d'intensité lumineuse est donc de 0,822 par m.m. de hauteur de flamme.

L'orifice doit avoir exactement 1 millimètre de diamètre, une variation de $0^{mm},05$ produit une variation d'intensité lumineuse de 3 p. 100 avec la même dépense de gaz; il est très facile de déterminer ce diamètre à $0^{mm},5$ près, en sorte qu'on peut être sûr de l'intensité lumineuse à 1 p. 100 près.

L'influence de la composition du gaz sur l'intensité du bec bougie a été trouvée négligeable en ayant soin de maintenir la flamme à la hauteur normale de $67^{mm},5$ par un réglage approprié du rhéomètre; il en résulte simplement une dépense de gaz plus considérable.

La même remarque s'applique pour les variations dans la densité du gaz; la dépense varie seulement avec celle-ci. Pour une densité de 0,4 par rapport à l'air, la dépense du bec bougie est de 25 litres à l'heure.

Quant à l'influence de la pression atmosphérique, M. Giroud a démontré qu'elle était négligeable ; il en est de même pour les variations de température comprises entre 15 et 25°.

La flamme du bec-bougie est donc un étalon absolu, dont l'intensité a été, par définition, construite de manière à égaler un dixième de carcel, mais qui est susceptible d'être reproduit identique à lui-même.

Étalons photométriques relatifs de Giroud.

96. Cependant, les avantages de l'étalon Giroud sont surtout considérables dans la comparaison des foyers lumineux intenses pour lesquels on utilise alors les étalons relatifs dont voici la description sommaire.

C'est un fait d'observation que, pour Paris par exemple, lorsque la flamme de l'étalon absolu a été portée à $67^{mm},5$ au moyen du robinet K,

la dépense rhéométrique est de 25 litres à l'heure de gaz réglementaire, à la densité de 0,4.

On peut reproduire avec facilité ce régime d'écoulement avec un appareil pourvu du robinet K, à la condition de percer sur la capsule un orifice rhéométrique de dimensions convenables et auquel il ne sera plus touché.

Les deux photorhéomètres B et C des figures 46 et 47 sont munis chacun d'un brûleur convenablement choisi et réglé, de manière à

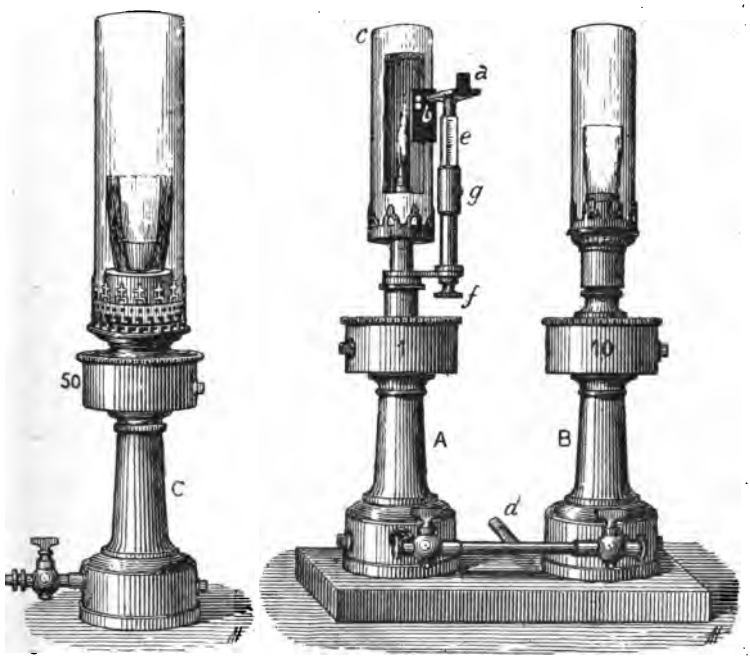


Fig. 46 et 47. — Photorhéomètre de Giroud.

dépenser le volume de gaz, *quel qu'il soit*, qu'il est nécessaire de brûler pour produire, l'un dix fois, l'autre cinquante fois plus de lumière que n'en donne A, lorsque le même gaz les alimente tous.

Si le gaz est réglementaire, A vaudra 0,1 carcel, B 1 carcel et C en vaudra 5; si le gaz n'est pas réglementaire, la flamme de A sera plus courte ou plus longue que $67^{mm},5$ et chaque millimètre de différence représentera une altération de 2,2 p. 100 dans la valeur des étalons B ou C.

Pour mesurer exactement la longueur de la flamme du bec bougie, on se sert d'une mire dont la figure 48 donne une idée suffisante ; la ligne de visée est donnée par le bord inférieur de l'écran *a* et par le point de

tangence des deux trous circulaires percés dans l'écran *b*. Il ne paraît pas cependant que ce procédé de mesure de la longueur de la flamme soit suffisamment exact. C'est du moins ce qui ressort des nombreuses mesures faites par MM. Heisch et Hartley au nom du *Gas Institute*.

Les mesures de MM. Heisch et Hartley (1) ont montré que le bec Argand-Giroud de 1 carcel, pour une longueur de flamme du bec bougie de 67^{mm},5, valait 10 bougies anglaises lorsque la flamme du bec bougie était de 69^{mm},5, le gaz employé étant au titre de 15,8 bougies.

Voici, entre autres, quelques résultats qui montrent la concordance réalisée entre les mesures directes de l'intensité lumineuse de l'Argand-Giroud et l'intensité calculée d'après les indications de l'inventeur.

TITRE DU GAZ (2).	LONGUEUR DE LA FLAMME du bec-bougie.	INTENSITÉ LUMINEUSE réelle de la flamme Argand	INTENSITÉ LUMINEUSE calculée de la flamme Argand	DIFFÉRENCE EN 0/0.
bougies.				
15.47	69.0	10.31	9.89	+ 4.2
15.80	69.5	10.00	10.00	0.0
15.80	69.5	10.13	10.00	+ 1.3
15.64	69.5	10.17	10.00	+ 1.7
15.94	68.5	10.31	9.78	+ 5.4
15.90	69.7	10 23	9.9	+ 2.7
16.06	71.6	10.80	10.46	+ 3.2
15.98	72.0	10.85	10.55	+ 2.9

La différence moyenne est de 2,5 p. 100. La conclusion de MM. Heisch et Hartley est favorable à l'étalon Giroud. Ces deux ingénieurs pensent en effet que, dans la pratique ordinaire, avec une mire mieux disposée, les erreurs propres de l'instrument ne dépasseraient pas 3 p. 100, le titre de gaz variant de 15 à 16,5 bougies.

M. Uppenborn a effectué aussi quelques mesures (3) de l'intensité lumineuse du bec bougie Giroud, à un trou, qui tendent à prouver que le rhéomètre ne règle pas aussi exactement qu'on le croit généralement le débit du gaz et par conséquent la hauteur de la flamme. M. Uppenborn a trouvé que l'intensité lumineuse du bec bougie augmente lentement après l'allumage pendant une durée de temps atteignant souvent deux heures.

(1) *Journal des usines à gaz*, 1884 et 1885.

(2) Rappelons rapidement ce que l'on entend par titre du gaz. En France, on fixe le titre du gaz en stipulant la consommation nécessaire pour obtenir l'intensité lumineuse d'une lampe Carcel brûlant 42 grammes d'huile de colza épurée à l'heure. En Angleterre, on détermine le nombre de bougies correspondant à une consommation de 5 pieds cubes (141,6 litres), de gaz à l'heure. Dans le premier cas, le bec employé est un bec Bengel à 30 trous, dans le second, un brûleur Argand (London Argand n° 1 de Sugg).

(3) *Lumière électrique*, vol. XXVIII, p. 330.

Voici d'après lui quelles sont les valeurs du bec bougie Giroud en fonction de l'étalon Hefner, pour diverses hauteurs de flamme :

Hauteur de la flamme en millimètres.	Intensité lumineuse en Hefner.	Variations de l'intensité lumineuse par millimètre de flamme.
81	1,369	
		0,0226
71	1,143	
		0,0178
61	0,965	
		0,0127
51	0,838	

L'ÉTALON-ÉCRAN METHWEN.

97. M. John Methwen annonçait, en 1878, à la *British association of Gas Managers*, qu'il avait découvert que des portions d'une flamme de gaz de différentes qualités, brûlées de façon à obtenir une combustion parfaite dans des becs Argand semblables, ont un pouvoir éclairant égal.

M. Methwen avait, en outre, déterminé les parties spéciales d'une flamme Argand qui émettent la même quantité da lumière en alimentant le bec avec des gaz de différentes qualités, de façon à donner naissance à la flamme de trois pouces; il avait aussi trouvé le moyen d'éviter la radiation vers le photomètre de tous autres rayons que ceux appartenant à la partie constante de la flamme.

Le procédé primitif de M. Methwen était le suivant : en face du brûleur, entre lui et le photomètre, est placé un écran en cuivre noirci. Une ouverture rectangulaire d'un pouce de hauteur sur un quart de pouce de largeur est pratiquée dans l'écran qui ne permet ainsi que le passage d'une quantité de lumière égale à celle que donnent deux bougies de spermaceti.

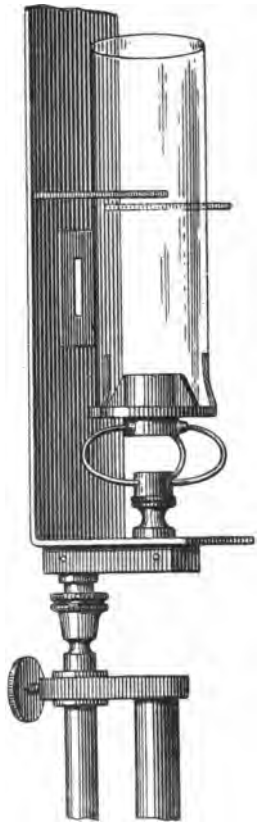


Fig. 48. — Écran de Methwen.

Les premiers essais ont été faits à l'aide du gaz courant; plus tard M. Methwen (1) a entrepris une série de mesures pour déterminer l'influence du titre du gaz sur son pouvoir éclairant, et parvenir ainsi, par une carburation appropriée du gaz, à un pouvoir éclairant rigoureusement comparable à lui-même et, partant, à un étalon lumineux constant.

(1) *Journal des usines à gaz*, 1883.

Il a trouvé que des gaz, étant à l'origine de qualités différentes, produisent la même qualité de lumière lorsqu'ils sont carburés et brûlés par le même bec avec une flamme de 2,5 pouces.

L'hydrocarbure employé est le pétrole connu généralement sous le nom de *gazoline*. Ce pétrole a un poids spécifique très faible, il possède un point d'ébullition très bas et émet ses vapeurs à la température ordinaire, en sorte que du gaz l'évapore complètement en passant à sa surface, à une température de 10 degrés centigrades.

Le carburateur adopté par M. Methwen se compose de plusieurs baquets de tissu métallique très fin, fixés sur un plan incliné dans une petite chambre rectangulaire ; la quantité nécessaire d'hydrocarbure est réglée et s'écoule d'un réservoir sur le baquet du haut ; la volatilisation de l'essence commence aussitôt ; ce qui n'est pas évaporé dans le compartiment du haut tombe dans le second, et ainsi de suite. En passant simplement au-dessus des baquets en question, le gaz se sature et est ensuite consumé par le brûleur. La quantité de gazoline qui s'écoule dans le carburateur étant réglée avec soin, elle se volatilise complètement et on obtient ainsi un gaz carburé de qualité uniforme. Voici, par exemple, l'effet de la carburation produite par cet appareil sur du gaz de qualité différente.

Qualité du gaz avant la carburation.	Qualité du gaz après la carburation.	Variations.
10,51 bougies.	62,86 bougies.	+ 0,54 bougie.
13,82 —	60,38 —	— 1,94 —
16,25 —	61,92 —	— 0,40 —
18,85 —	62,49 —	— 0,17 —
20,44 —	63,77 —	+ 1,65 —
Moyenne.....	62,32 bougies.	

Il faut placer le carburateur dans un bain à 10 degrés environ, afin de compenser le froid produit par l'évaporation de l'essence.

L'écran de Methwen, sous sa forme la plus récente, se compose d'un plateau mobile portant deux écrans d'argent; l'un d'eux, percé d'une ouverture rectangulaire d'un pouce ($25^{mm},40$) de longueur sur 0,233 pouce ($5^{mm},06$) de largeur, est destiné à l'emploi du gaz courant non carburé ; l'autre, qui s'emploie lorsqu'on brûle du gaz carburé comme il est indiqué plus haut, a une fente de 0,585 pouce ($14^{mm},86$)] de long sur 0,310 pouce ($7^{mm},87$) de large.

Le brûleur employé est un bec à verre ordinaire (Standard London Argand n° 1) de Sugg. La base de l'ouverture servant au gaz courant est à 1 pouce ($26^{mm},40$), et celle pour le gaz carburé à 0,96 pouce ($24^{mm},38$) au-dessus du niveau supérieur du brûleur; la distance horizontale du centre de la flamme à l'écran est de 1,5 pouce ($38^{mm},10$). La hauteur de la flamme du brûleur est de 3 pouces ($76^{mm},2$) pour le gaz carburé ;

ces deux hauteurs de flamme sont définies par un double jeu de tiges horizontales formant mires et fixées sur l'écran. La cheminée du brûleur Argand a 2 pouces ($50^{mm},8$) de diamètre et 6 pouces ($152^{mm},4$) de longueur.

L'étalon Methwen, de construction très simple, n'est pas sujet à des dérangements, et son usage est extrêmement facile. Il est bien meilleur que la bougie dans un photomètre à air libre, en employant le gaz courant. Quant à l'écran Methwen à gaz carburé, ses indications sont très concordantes. Ainsi, M. Dibdin, dans une étude très approfondie des divers étalons lumineux, a trouvé, sur 283 expériences, 211 ou 74 p. 100 dans lesquelles les résultats ne diffèrent pas de 1 p. 100 de la moyenne.

Les becs Giroud ou Methwen peuvent rendre des services marqués comme étalons intermédiaires, à la condition toutefois d'en avoir déterminé la valeur, comparativement à l'étalon absolu. En alimentant ces becs par du gaz emmagasiné dans le gazomètre du laboratoire, au commencement de l'expérience, on dispose d'une source de lumière qui reste constante pendant plusieurs heures, et dont l'emploi n'exige aucune manipulation délicate. C'est un avantage considérable qui fait de ces becs, notamment de celui de M. Giroud, des auxiliaires précieux pour les recherches photométriques.

L'ÉTALON AU PENTANE DE M. VERNON-HARCOURT.

98. Les objections que l'on peut faire aux étalons photométriques dans lesquels on emploie le gaz d'éclairage ordinaire cesseraient évidemment d'être fondées si l'on pouvait avoir un gaz de composition constante. C'est cette constance de composition qu'a cherché à réaliser, dans une certaine mesure, M. Methwen, en remplaçant le gaz courant par du gaz carburé.

Une solution plus parfaite du problème a été trouvée, après de nombreux essais, par M. Vernon-Harcourt; le combustible employé par ce dernier est de l'air carburé au moyen de carbures d'hydrogène volatils, extraits du pétrole.

On prépare le carbure par une distillation fractionnée de la gazoline, préalablement lavée à l'acide sulfurique et à la soude caustique. Le liquide décanté est distillé quatre fois, successivement à 60°, 55°, 50° et une dernière fois à 50°. Le produit qu'on obtient se compose d'hydrocarbures de la série $Cn_2Hn + 2$, principalement de pentane mélangé avec ses homologues, le tétrane et l'hexane. Son poids spécifique varie entre les limites 0,628 et 0,631 à 15°.

On peut employer l'air carburé de pentane de deux manières; dans l'un des étalons, le gaz est préparé d'avance et renfermé dans un gazomètre spécial, dans l'autre il est préparé au fur et à mesure de sa com-

bustion, précisément comme cela a lieu dans le cas d'une lampe et des bougies.

99. Voici, d'après M. Monnier (1), la manière de préparer l'air carburé type, suivant la définition donnée par M. Vernon-Harcourt.

Pour préparer l'air carburé type, on laisse l'hydrocarbure se mêler à l'air par diffusion de sa vapeur, dans la proportion de 3 pouces de liquide pour 1 pied cube d'air (1 centimètre cube de liquide pour 376 centimètres cubes d'air), mesuré à la pression de 76 centimètres de mercure et à la température de 15°; en rapportant le pentane au volume qu'il occupe à l'état de vapeur, 20 volumes d'air sont mélangés avec 7 volumes de pentane.

Le gazomètre (fig. 49 et 50) se compose d'une cloche cylindrique de 7 pieds cubes de capacité (environ 200 litres), suspendue et équilibrée dans une cuve annulaire remplie d'eau. Une échelle graduée, fixée à la cloche, sert à mesurer le volume gazeux. Sur la calotte qui est plane, pour éviter les espaces nuisibles, se trouvent deux tubulures : l'une donne passage à un thermomètre; dans l'autre est fixé un récipient en verre de forme spéciale.

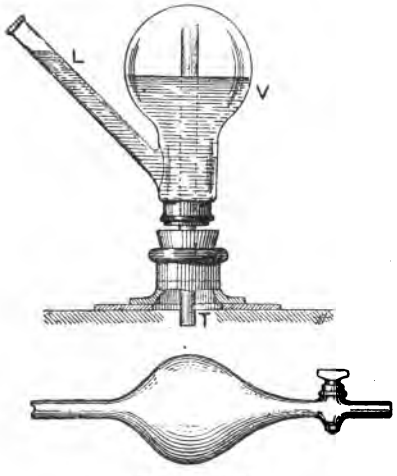


Fig. 49 et 50.

Pour préparer le mélange, on aspire dans la cloche 3 pieds cubes d'air mesuré à 76 centimètres de mercure et à 15°; on remplit de pentane une pipette graduée qui contient 9 pouces cubes jusqu'au trait de jauge.

La pointe de la pipette étant introduite dans la tubulure latérale L du vase V (en partie plein d'eau), on ouvre le robinet; le pentane s'écoule, monte à la partie supérieure de V et pénètre dans la cloche par le tube T. On chasse les dernières portions de pentane en soufflant légèrement; lorsque tout le liquide est écoulé, on retire la pipette et on fait passer dans la cloche les dernières portions de pentane en versant de l'eau par la tubulure latérale I. La diffusion est complète au bout de cinq à six heures; à ce moment, le volume gazeux doit être de 4,05 pieds cubes avec une tolérance de 1 p. 100.

La vapeur de l'hydrocarbure employé pour carburer l'air doit être très peu soluble dans l'eau, afin que la composition du gaz ne s'altère

(1) *Journal des usines à gaz*, 1883.

pas au contact de l'eau du gazomètre; cette condition exclut l'emploi du gaz oléifiant, de l'éther et de la benzine, qui sont assez solubles dans l'eau tandis que le pentane l'est très peu; 100 volumes d'eau bouillie ne dissolvent que 0,92 volume de vapeur de pentane.

Cette solubilité est suffisante pour modifier légèrement la composition du premier gaz préparé dans une cloche sur de l'eau pure; mais, après une opération ou deux, l'eau est saturée et les écarts de composition du gaz ne pouvant provenir que d'un changement du coefficient de solubilité avec la température sont très faibles.

La vapeur de pentane se comporte comme un gaz parfait dans les limites de température et de pression usuelles : le mélange d'air et de vapeur de pentane constitue donc un gaz de composition constante.

Le brûleur adopté par M. Vernon-Harcourt est un bec-bougie en cuivre jaune, à cause de la facilité avec laquelle ce métal se travaille. L'orifice est circulaire; il est percé dans une plaque de cuivre de $1^{mm},27$ d'épaisseur et doit avoir $6^{mm},35$ de diamètre (0,25 pouce).

Cette dimension peut être reproduite exactement à $0^{mm},02$ près, c'est-à-dire avec une erreur inférieure à 0,7 p. 100 de la section totale de l'orifice. On a choisi le diamètre le plus grand compatible avec la fixité de la flamme. Le corps du brûleur a 4 pouces ($101^{mm},6$) de longueur et 1 pouce ($25^{mm},4$) de diamètre.

La hauteur de la flamme normale est de 2,5 pouces ($63^{mm},5$), mesurée à partir de l'orifice du bec; dans ces conditions, la consommation du gaz normal est comprise entre 0,48 et 0,52 pieds cubes à l'heure (13,6 à 14,7 litres). La hauteur de la flamme est indiquée par un fil de platine porté par une tige parallèle au bec.

Le gaz est mesuré par un petit compteur et sa consommation est en outre réglée par un régulateur sensible.

Dans les conditions ci-dessus, l'étalon Harcourt donne exactement une intensité lumineuse égale à celle d'une bougie spermaceti.

Pour les besoins de la photométrie industrielle, on peut réaliser un étalon de lumière assez intense, de dix bougies environ, d'une constance très grande, en alimentant un bec Argand (*Standard London Argand*, n° 1 de Sugg) ,combiné avec l'écran Methwen, avec de l'air gaz au pentane de M. Harcourt. C'est ce qui a été fait entre autres par M. Dibdin.

Il suffit même, pour carburer l'air, de le faire passer simplement sur du pentane liquide, dans le carburateur Methwen.

M. Dibdin a trouvé que, dans ces conditions, la hauteur de la flamme pouvait varier de 2,5 à 6 pouces sans que la quantité de lumière émise sur l'écran variât d'une façon sensible. La hauteur normale de la flamme est alors de 3 pouces ($76^{mm},2$), mais une légère variation dans cette hauteur n'affecte guère l'étalon. Cependant l'Argand au pentane n'offre pas de contrôle du fonctionnement du bec, en sorte qu'on ne peut guère

songer à l'employer avec sécurité dans les mesures photométriques, encore moins à lui donner une sanction légale.

Modèle de laboratoire de l'étalon au pentane.

100. La lampe à air-gaz dans laquelle le mélange gazeux est préparé

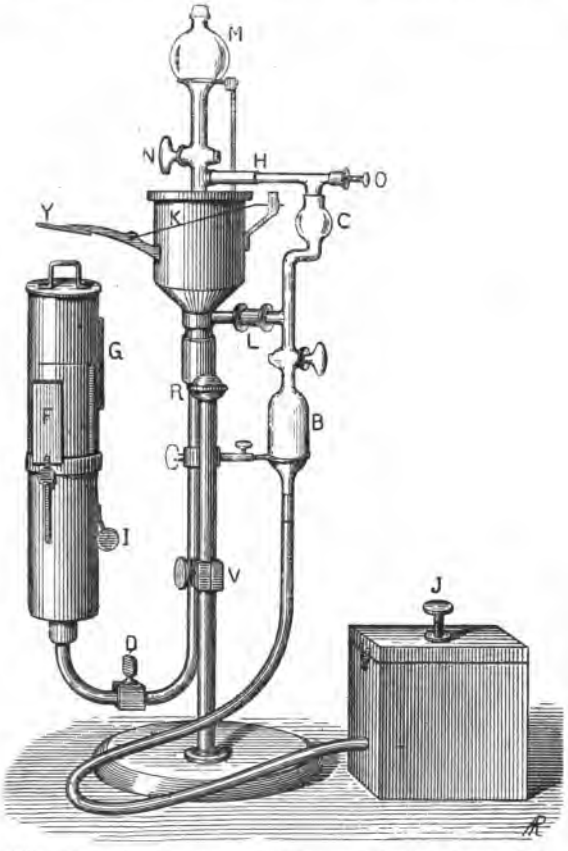


Fig. 51. — Lampe au pentane (modèle de laboratoire).

au moment de la combustion, a subi des modifications assez importantes depuis le moment ou M. Vernon-Harcourt en a présenté le premier modèle. Celui-ci livrait des résultats peu concordants s'il faut en juger d'après les nombreuses mesures de MM. Heisch et Harley, tandis que le modèle définitif, présenté à l'Association britannique en 1887, reproduit l'étalon lumineux avec une exactitude très grande; c'est du moins ce qui ressort du rapport de M. Dibdin sur les conclusions duquel nous reviendrons plus loin.

Voici la description du modèle de laboratoire de l'étalon au pentane, tel que le construit la maison Woodhouse et Rawson, à Londres (fig. 51).

L'admission des vapeurs au bec se fait exclusivement sous l'action de la pesanteur et sans l'emploi d'un régulateur. L'air et la vapeur sont mélangés dans un réservoir M, d'où ils descendent au bec. A un certain point, le diamètre du conduit à travers lequel s'écoule le gaz est réduit, et il y a entre cette réduction et la hauteur du réservoir une proportion telle que, lorsque le mélange, dans les proportions ci-dessus indiquées, est envoyé dans le tube, il vient brûler avec une flamme de $63^{mm},5$ de hauteur.

Le pentane est introduit à l'état liquide dans le ballon M, d'où il se rend dans le réservoir B où il se vaporise; la vapeur passe par C et H et descend ensuite par son poids dans le tube vertical qui débouche à l'intérieur du réservoir R où le mélange de la vapeur et de l'air devient plus intime; le mélange traverse le robinet D et arrive au brûleur FG.

Pour régler la vitesse et la régularité de l'écoulement du mélange, on fait passer les vapeurs de pentane dans un tube thermométrique qu'on bouche sur une longueur plus ou moins grande, au moyen d'un fil de platine attaché à une vis O. On peut ainsi donner au pentane la vitesse d'admission nécessaire pour que la flamme ait exactement $63^{mm},5$ de hauteur.

Le niveau du pentane dans le réservoir a naturellement une certaine influence dont on tient compte de la manière suivante. La boîte carrée représentée sur la figure contient un ballon en caoutchouc rempli d'eau et relié par un tube souple au réservoir; lorsque le niveau du pentane est trop bas, on comprime le ballon au moyen de la vis J et l'on fait entrer une certaine quantité d'eau dans le réservoir B au-dessous du pentane. Dans le cas contraire, on desserre cette vis et on laisse l'eau redescendre,

Le disque de cuivre massif Y, suspendu au-dessus de la flamme à une hauteur variable, sert à compenser l'influence de la température extérieure; la cheminée G met la flamme à l'abri des courants d'air.

Modèle industriel de l'étalon au pentane.

101. M. Vernon-Harcourt a simplifié encore cet appareil de manière à le rendre portatif et beaucoup plus simple sans rien lui enlever de sa précision.

La nouvelle lampe de M. Vernon-Harcourt, au lieu de brûler un mélange d'air et de vapeur de pentane, brûle des vapeurs de pentane seulement; la flamme est entourée d'une cheminée qui produit un tirage suffisant et qui lui donne une tranquillité satisfaisante; la flamme est aussi blanche que dans le modèle primitif de l'étalon au pentane, ce qui est une condition très importante.

La nouvelle lampe-étalon représentée dans la figure 52 a une forme analogue à celle des brûleurs à alcool ordinaires, avec une cheminée en métal en plus. La cheminée métallique produisant un fort courant d'air donne la fixité nécessaire à la flamme et augmente sa température, ce qui lui donne également une couleur plus blanche.

On fait usage d'une mèche, ce qui serait un désavantage sérieux si la combustion avait lieu à son extrémité; ce n'est pas le cas, car elle sert uniquement à amener le pentane par capillarité du réservoir inférieur jusqu'à l'endroit du porte-mèche où il se vaporise sous l'influence de la chaleur produite par la combustion de la vapeur, 5 ou 8 centimètres plus haut. La mèche entre à frottement doux dans un tube ouvert à ses deux extrémités et entouré lui-même d'une chemise métallique beaucoup plus large, destinée à maintenir une température plus constante; la combustion de la vapeur de pentane a lieu à l'extrémité de ce tube extérieur; le tout est entouré d'un troisième tube beaucoup plus large qui se rétrécit à sa partie supérieure de façon à n'avoir plus que le diamètre de la cheminée de verre. Celle-ci s'élargit à sa partie supérieure et est fixée à l'enveloppe métallique de la lampe à l'aide des deux bras mobiles visibles sur la figure.

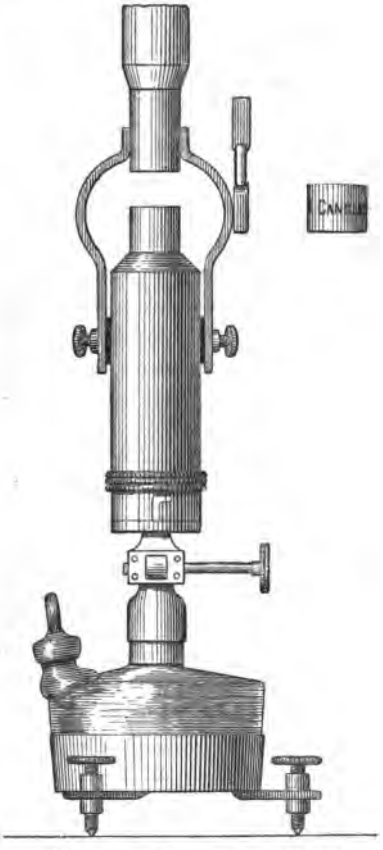


Fig. 52. — Lampe au pentane (Modèle industriel).

Le fonctionnement de la lampe est le suivant; en montant le porte-mèche et en chauffant un peu le tube intérieur, la vapeur de pentane se dégage immédiatement et on l'allume. On place alors la chemise extérieure avec la cheminée, en sorte que la flamme s'élève immédiatement par suite de l'augmentation du tirage et son extrémité pénètre dans la cheminée. Celle-ci porte à une hauteur de 10 millimètres deux fentes horizontales diamétralement opposées, en sorte qu'on peut, en visant au travers, régler exactement la hauteur de la flamme.

La cheminée mobile étant réglée en hauteur, et la hauteur de la

flamme étant déterminée exactement par les deux fentes sus-mentionnées, la portion de la flamme comprise entre la chemise inférieure et la cheminée émet une quantité de lumière parfaitement définie.

On sait que la quantité de lumière émise par la partie centrale d'une flamme n'est que très peu affectée par les variations de hauteur de celle-ci. M. Harcourt et les constructeurs ont déterminé soigneusement les dimensions de la lampe qui correspondent à une intensité lumineuse de une bougie ou de deux bougies. On peut, en variant la hauteur de la cheminée, obtenir une intensité lumineuse quelconque, dans les limites de puissance de l'appareil.

La hauteur de la cheminée est vérifiée à l'aide d'une jauge cylindrique spéciale de même diamètre que la partie inférieure de la cheminée, et qu'on place entre celle-ci et le tube extérieur de la base; la cheminée est alors fixée dans cette position à l'aide des vis de réglage.

Les variations de hauteur de la flamme sont très faibles, elles deviennent insensibles dix minutes ou un quart d'heure après l'allumage. La base de l'appareil se règle horizontalement à l'aide d'un niveau, et un petit miroir placé derrière les fentes facilite l'observation de la hauteur de la flamme.

La nouvelle lampe au pentane est d'une manipulation plus aisée que la lampe à acétate d'amyle de von Hefner-Alteneck, puisque les variations dans la hauteur de la flamme n'ont qu'une influence très faible sur l'intensité lumineuse ; la flamme est en outre beaucoup plus blanche.

102. Les résultats obtenus avec l'air-gaz de M. Harcourt sont différents suivant les observateurs qui ont étudié cet étalon avec soin ; il y a là évidemment une question de préférence personnelle.

Ainsi, tandis que MM. Heisch et Hartley préconisent plutôt l'écran Methwen, M. Dibdin, se fondant sur des mesures comparatives très étendues et très soignées, estime que la lampe à pentane de M. Harcourt est, de tous les étalons photométriques industriels, celui dont l'intensité lumineuse est la plus constante et la plus fixe.

Nous extrayons ce qui suit de son rapport présenté au *Metropolitan Board of Works* de Londres.

« La flamme de pentane répond à toutes les conditions qu'on peut lui imposer. Les expériences ont montré que la préparation de l'air carburé était chose facile et non dangereuse, que la mesure du volume d'air consommé était simple et précise, que le réglage de la hauteur de la flamme était très exact, que celle-ci offrait toute la fixité désirable quand on opérait avec soin, et enfin que la couleur de sa lumière était identique à celle d'une flamme de gaz.

« Pendant toute la durée des essais, on n'a eu aucun défaut à signaler sous le rapport de la fixité de la lumière. La seule précaution à prendre est d'éviter les courants d'air ».

Une variation de 2 p. 100 dans l'intensité lumineuse de la flamme de pentane est exceptionnelle, tandis que pour les bougies, par exemple, une variation de 10 p. 100 est une chose normale.

Quant à la valeur de l'étalon au pentane, M. Dibdin a trouvé qu'elle était sensiblement égale à celle d'une bougie anglaise.

Pour résumer l'étude des différents étalons lumineux basés sur la combustion, voici le tableau qui récapitule les nombreuses observations de M. Dibdin. Il renferme dans la première colonne le nombre total d'expériences exécutées sur chaque étalon, dans la seconde le nombre de celles dont les résultats diffèrent de la moyenne de moins de 1 p. 100, et enfin dans la troisième le rapport de ces nombres.

Bougie	454	154	34 p. 100.
Lampe de Keate (1)	244	98	39 —
Pentane (modèle primitif)	468	373	80 —
Methwen	282	211	74 —
Argand au pentane	243	212	87 —
Lampe à l'acétate d'amyle	225	206	90 —
Lampe au pentane	154	150	97 —

Ces résultats représentent, en quelque sorte, la valeur respective des divers étalons photométriques; mais avant d'être admis comme définitif, ce classement demande à être confirmé, car l'exactitude des mesures photométriques dépend beaucoup des conditions particulières à l'observateur.

Etalons basés sur l'incandescence du charbon et du platine.

Étalon Schwendler.

103. L'étalon Schwendler se compose d'une lame de platine en forme de fer à cheval; cette lame étant découpée dans une feuille de grandes dimensions, on conserve deux appendices, de surface considérable, reliés aux bornes de l'appareil; l'échauffement du conducteur a lieu ainsi uniquement dans la partie du fer à cheval.

L'unité lumineuse adoptée par Schwendler (PLS) est la quantité de lumière émise par une feuille de platine de la forme qui précède, ayant 2 millimètres de largeur, $36^{mm},28$ de longueur, $0^{mm},017$ d'épaisseur et pesant $0^{mgr},0264$, parcourue par un courant constant de 6,15 ampères.

Les causes qui influent sur la quantité de lumière émise par une lame

(1) La lampe de Keate est employée en Angleterre seulement; nous ne nous en sommes pas occupé en détail, car elle ne diffère de la lampe Carcel que par l'huile avec laquelle on l'alimente. La lampe de Keate brûle de l'huile de paraffine au lieu d'huile de colza; mais ses conditions de fonctionnement sont analogues à celles de la lampe Carcel et tout ce que nous avons dit de cette dernière peut s'y appliquer.

de platine, chauffée par le courant électrique, sont trop nombreuses pour que l'on puisse compter sur la constance de la lumière émise, si l'on se borne simplement à contrôler la constance du courant. Les variations du pouvoir émissif, ainsi que la diminution de section de la lame de platine sous l'influence d'une incandescence prolongée, sont des facteurs dont il est difficile de tenir compte. Ces circonstances ont, dès l'origine, inspiré une certaine défiance contre l'étalon Schwendler, en sorte qu'il ne s'est répandu ni dans les mesures industrielles, ni dans les recherches scientifiques.

La lampe à incandescence comme étalon absolu.

104. M. Preece, considérant que les lampes à incandescence d'un type donné, provenant du même fabricant, n'offrent entre elles, au point de vue de l'intensité et du rendement lumineux, que des différences insignifiantes, a pensé qu'on pourrait obtenir, à l'aide d'une lampe à incandescence, un étalon photométrique très commode et suffisamment exact pour la plupart des mesures industrielles. Il suffirait alors, comme dans l'étalon Schwendler, de maintenir le courant à une intensité déterminée.

Cette idée a été présentée à nouveau par Edison, quelque temps après la communication de M. Preece; les variations du pouvoir émissif des filaments de charbon très sensibles quelquefois d'une lampe à l'autre, et la transparence plus ou moins grande de l'ampoule, sont autant de facteurs qui s'opposent à l'adoption d'une unité de ce genre.

Nous ne voulons pas dire par là qu'on doive, *à priori*, éviter l'emploi des lampes à incandescence dans les mesures photométriques. Dans certains cas il est, au contraire, très avantageux d'utiliser une de ces lampes comme étalon intermédiaire. Mais l'adoption d'une lampe à incandescence type comme étalon absolu n'aura pas lieu de sitôt, car ses inconvénients ne sont pas de nature à être supprimés, à moins de perfectionnements considérables dans la construction de ces foyers lumineux. Cependant, si jamais l'invariabilité de l'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence pour une dépense d'énergie constante pouvait être atteinte, la lampe à incandescence fournirait un étalon photométrique absolu très commode; on pourrait alors le définir par la nature et les dimensions du filament et par l'énergie absorbée exprimée, par exemple, en *ergs* par seconde.

La lampe à incandescence comme étalon intermédiaire.

105. Jusqu'à ces dernières années, les mesures photométriques industrielles étaient surtout effectuées pour vérifier l'intensité lumineuse des foyers à gaz. C'est dans ce fait qu'il faut chercher l'explication du grand

nombre d'étalons photométriques réalisés à l'aide de la combustion du gaz ordinaire ou d'un gaz spécial dans un brûleur type. Ces étalons sont très commodes dans les laboratoires photométriques des usines à gaz où l'on dispose de tous les appareils accessoires indispensables à leur bon fonctionnement. Il n'en est pas de même dans les laboratoires d'électricité industrielle où l'on dispose généralement d'une simple prise sur la canalisation du gaz. Mais ces laboratoires possèdent par contre un outillage complet pour la production et le réglage de la lumière à l'aide des lampes à incandescence. Il est donc naturel d'avoir recours à ces lampes comme étalons intermédiaires dans les mesures de la photométrie électrique.

Une lampe à incandescence fournit une lumière d'une intensité constante pendant un laps de temps assez long, à condition que le nombre de watts dépensés dans le filament reste invariable. Il est facile de réaliser cette condition en alimentant la lampe par le courant d'une batterie d'accumulateurs. C'est de cette manière seulement qu'on peut réaliser une constance suffisante, sans avoir à s'occuper constamment du réglage du courant. Il est facile de déterminer les conditions auxquelles doit satisfaire le courant qui alimente une lampe à incandescence, destinée à servir d'étalon photométrique intermédiaire.

En première approximation, l'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence est proportionnelle au cube de la puissance W dépensée dans le filament (§ 128),

$$I = aW^3.$$

On en déduit en différenciant :

$$dI = 3aW^2dW.$$

Cette formule permet de calculer la variation de l'intensité lumineuse qui correspond à la variation dW de l'énergie absorbée par le filament.

Pour une lampe Edison de 100 volts donnant 16 bougies avec une dépense de 56 watts (3,5 watts par bougie), la valeur de a est égale à 0,00009 environ. La valeur de dW qui produit une erreur dL de 1 pour cent, c'est-à-dire de 0,16 bougie, est donc égale à

$$dW = \frac{dI}{3aW^2} = \frac{0,16}{3.0,00009.(56)^2} = 0,19 \text{ watt.}$$

Pour que la lampe à incandescence puisse être utilisée comme étalon photométrique, il faut pouvoir compter sur une constance d'au moins 1 pour cent. Il faut disposer dans le cas considéré d'appareils permettant de maintenir la dépense d'énergie constante à 0,2 watt près sur 56 watts, c'est-à-dire à 0,4 p. 100.

Les accumulateurs seuls permettent de satisfaire à cette condition. Le courant fourni par une dynamo, même munie d'un excellent régulateur, n'est pas suffisamment constant. Quant aux piles, leur force électromo-

trice et leur résistance varient trop pour qu'il puisse en être question, tandis qu'une batterie d'accumulateurs déchargée avec un courant de faible intensité présente une constance de débit et de force électro-motrice remarquables pendant plusieurs heures. Dans certains cas les variations sont impossibles à constater, même avec les instruments de mesure les plus précis.

Il est pratique d'avoir recours à une lampe de faible voltage et d'intensité relativement considérable, à moins qu'on ne dispose d'une batterie d'accumulateurs d'une cinquantaine d'éléments permettant d'atteindre les 100 volts exigés par les lampes du type le plus courant. Il est vrai que, si l'on a recours aux lampes de faible voltage, le débit est plus élevé et la constance des éléments de la batterie d'accumulateurs est moins grande.

Le contrôle de l'énergie absorbée par la lampe étalon, c'est-à-dire la mesure simultanée de E et de I, peut se faire à l'aide d'un des nombreux procédés dont dispose tout laboratoire électrique. Il faut ne pas perdre de vue que ce contrôle doit être exact pour qu'il ait une valeur réelle sur le contrôle de l'intensité lumineuse. Son exactitude doit être plusieurs fois (au moins 4 fois) plus élevée que celle que l'on veut obtenir dans la constance de l'étalon lumineux. Il est inutile d'insister sur les dispositifs expérimentaux qu'on peut donner à ce contrôle, car ils sont en première ligne déterminés par les appareils dont on peut disposer. Cependant, il convient de dire que le contrôle le plus simple de l'intensité du courant paraît être la mesure de la différence de potentiel aux extrémités d'une résistance invariable et connue. Il est en même temps le plus commode puisque la mesure de la différence de potentiel aux bornes de la lampe peut se faire avec les mêmes appareils. C'est d'ailleurs ce procédé qu'ont employé MM. Lummer et Brodhun (1) dans leurs recherches sur l'emploi des lampes Siemens de 65 volts et 16 bougies comme étalons photométriques intermédiaires. Ces recherches ont montré que ces lampes donnaient une lumière d'une constance suffisante pour tous les besoins de la pratique; en outre, pendant un laps de temps assez long, ces lampes ont un rendement lumineux sensiblement constant, c'est-à-dire qu'elles absorbent la même quantité d'énergie pour produire la même intensité lumineuse. Il en résulte que l'étalonnage de la lampe à incandescence à l'aide de l'étalon absolu choisi n'a pas besoin d'être répété aussi fréquemment qu'il le semble nécessaire au premier abord

Étalon absolu Violle.

106. A la suite des travaux de M. Violle, la conférence des unités électriques a adopté la proposition de ce physicien de prendre comme

(1) *Zeitschr. für Instrumentenkunde*, 1890, p. 119.

unité photométrique la quantité de lumière émise par une portion déterminée de la surface d'un bain de platine en fusion.

La résolution adoptée par la conférence est conçue en ces termes :

L'unité de chaque lumière simple est la quantité de lumière de même espèce émise en direction normale par 1 centimètre carré de surface de platine fondu, à la température de solidification.

L'unité pratique de lumière blanche est la quantité de lumière émise normalement par la même source.

Une des premières conditions est d'avoir du platine parfaitement pur,

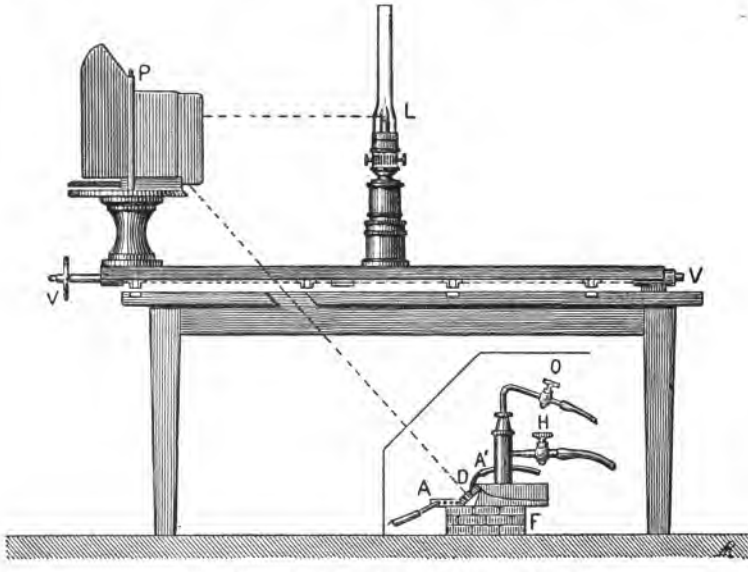


Fig. 53. — Reproduction de l'étalon Violle.

la présence de corps étrangers pouvant non seulement altérer la température de fusion mais aussi provoquer la formation d'oxydes ternissant la surface du bain et en modifiant le pouvoir émissif. La pureté complète n'est pas difficile à obtenir et d'ailleurs le même lingot de platine peut servir indéfiniment.

M. Violle (1) a employé pour produire la fusion du platine le four imaginé par MM. Deville et Debray dans leur travail sur la métallurgie de ce métal. Cet appareil consiste en un morceau de chaux creusé d'une cavité recevant le platine et muni d'un couvercle également en chaux, traversé par un chalumeau à gaz d'éclairage et oxygène ; on obtient ainsi une température bien supérieure au point de fusion du platine (1775°). Lorsque

(1) *Lumière électrique*, vol. XIV, p. 475.

le platine est fondu, on l'amène au-dessous d'un diaphragme percé d'une ouverture de surface déterminée qui peut être une fraction quelconque du centimètre carré; on obtient ainsi directement un multiple ou un sous-multiple de l'unité absolue. Le diaphragme à double enveloppe en

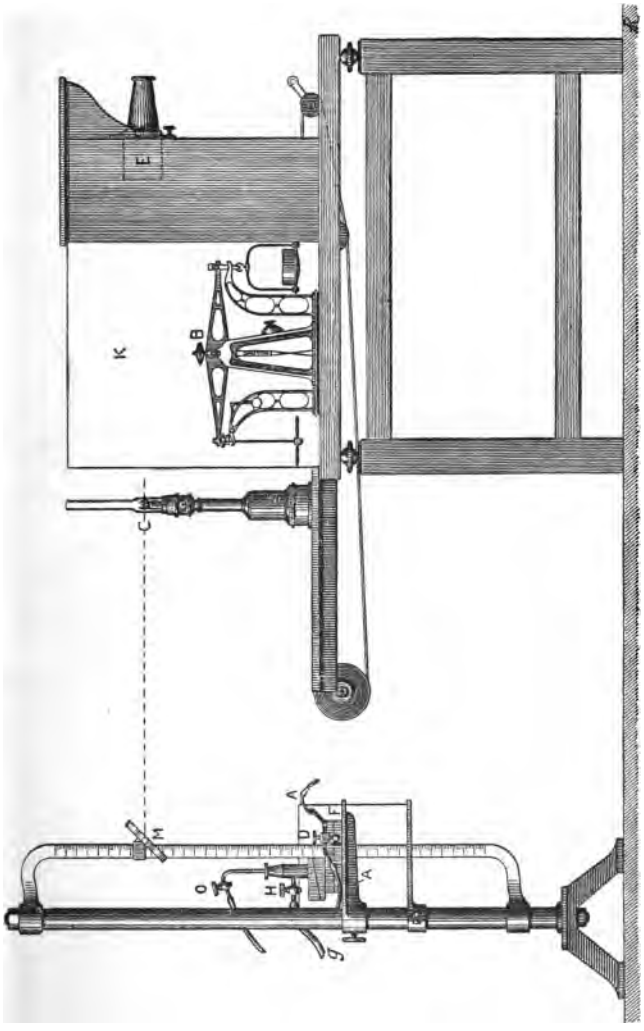


Fig. 54. — Reproduction de l'étalon Violle.

cuivre ou en platine, est traversé constamment par un courant d'eau froide.

La mesure photométrique devant être prise au moment de la solidification, voici la manière dont M. Violle conduit l'opération : on supprime le gaz et on laisse le métal liquide se refroidir librement; l'intensité lumineuse diminue d'abord rapidement, puis de moins en moins vite,

devient ensuite stationnaire, pour reprendre enfin quelques instants plus tard et après un *éclair* une marche de nouveau décroissante; le moment de la mesure est ainsi bien déterminé.

Les figures 53 et 54 montrent les dispositions photométriques qui ont servi à M. Violle à comparer son étalon avec la lampe Carcel. Le photomètre de la figure 53 est un photomètre Rhumford, du service des phares, disposé de manière à faire la comparaison avec la lumière émise à 45°, par le platine fondant; celui de la figure 54 est un photomètre Foucault avec balance automatique pour la lampe Carcel; avec ce photomètre on a mesuré la lumière émise normalement et réfléchie par un miroir à 45°.

C'est en procédant de cette manière que M. Violle a trouvé que l'étalon absolu, tel que l'a défini la Conférence internationale, vaut 2,08 unités Carcel.

Les principales objections que l'on a faites à l'étalon Violle sont : la complication des appareils, la difficulté des mesures et le prix élevé du platine qui doit être employé en quantité assez considérable. Au point de vue pratique, il était évident, de prime abord, que l'étalon absolu ne serait pas employé couramment; la conférence internationale, en adoptant la proposition de M. Violle, songeait bien plus à l'unification des étalons photométriques, qu'à créer une unité de lumière directement utilisable dans les mesures industrielles.

Cependant il ne faudrait pas en conclure que M. Violle ait renoncé à introduire son appareil dans la pratique industrielle; mais, tandis que les praticiens qui ont cherché à simplifier l'étalon absolu ont employé des masses de platine très faibles, sacrifiant ainsi l'exactitude à la commodité, M. Violle a visé à obtenir un appareil industriel tout en lui conservant les garanties d'exactitude offertes par l'appareil primitif.

Modèle simplifié de l'étalon Violle.

107. M. Carpentier a construit sur les indications de M. Violle l'appareil dont la figure 55 donne la perspective. La fusion du platine est obtenue par la combustion du gaz d'éclairage dans l'oxygène. La fusion du platine est obtenue dans un creuset en chaux. Ce creuset est composé de deux parties; la partie inférieure est creusée d'une cavité dans laquelle on place le lingot de platine, la partie supérieure sert de couvercle; elle est également creusée d'une cavité correspondante à celle de la partie inférieure.

Les deux blocs de chaux de la partie inférieure et de la partie supérieure du creuset sont encastrés dans une monture en fer; le couvercle du creuset est percé d'un canal circulaire D qui sert à amener les gaz. Ce canal renferme deux tuyaux concentriques d et d'; le tube intérieur

correspond au tube O amenant l'oxygène et le tube extérieur correspond au tuyau G par lequel arrive le gaz d'éclairage.

Les robinets d'accès des gaz sont commandés par deux tiges concentriques que l'on manœuvre à l'aide des boutons T et T'; chacune de ces tiges actionne une crémaillère qui commande un secteur denté par lequel se termine le robinet d'accès du gaz.

Lorsque le platine est fondu, on soulève légèrement le couvercle du creuset en appuyant sur la poignée P et on le déplace en le faisant pivoter autour de l'axe A par une pression latérale sur la poignée P. On imprime alors au creuset C un léger mouvement de va-et-vient en

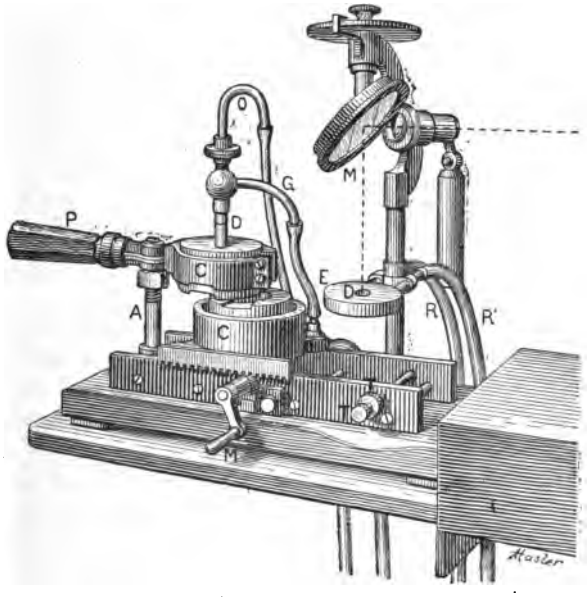


Fig. 55. — Étalon Violle. Modèle simplifié.

faisant osciller la manivelle M qui actionne la crémaillère F; on s'assure alors si la fusion du platine est bien complète et si sa surface est parfaitement brillante. En tournant la manivelle M on amène alors le creuset sous l'écran E. Cet écran en cuivre est percé d'un trou circulaire de 1 centimètre carré de surface; il est creux, de telle sorte qu'un courant d'eau froide, alimenté par les tuyaux R et R', empêche un échauffement trop considérable.

La quantité de lumière émise par la surface du platine, au moment de la solidification du métal, et qui traverse l'ouverture O de l'écran est alors exactement égale à l'unité absolue de lumière.

Le miroir M, réglable à volonté à l'aide d'un mouvement de rotation

autour de deux axes perpendiculaires l'un à l'autre, sert à renvoyer la lumière dans la direction voulue.

L'oxygène nécessaire à la fusion peut être obtenu de la manière ordinaire, au fur et à mesure des besoins; mais cette solution fort acceptable dans un laboratoire n'est pas du tout pratique pour les applications usuelles. Pour ces dernières il est plus simple d'employer l'oxygène sous pression qui est actuellement dans le commerce à un prix relativement peu élevé. Cet oxygène est renfermé dans des obus sous une pression de 50 atmosphères; comme la pression du gaz au sortir de la conduite ne dépasse pas quelques centimètres de mercure, il faut réduire la pression de l'oxygène à la même valeur; cette réduction de pression a lieu à l'aide d'un régulateur spécial adapté à l'obus.

Un obus ordinaire d'environ $0^m,30$ de diamètre et de $1^m,50$ de longueur permet de faire un très grand nombre de mesures. C'est ainsi que M. Violle s'est servi du même obus pour les nombreux essais qu'il a faits à l'intention des visiteurs de la salle de photométrie, à l'exposition de 1889.

Le creuset est d'une manipulation très simple et son installation ne présente aucune difficulté. Il suffit d'avoir une prise de gaz dans le voisinage et de disposer d'un obus d'oxygène. La mise en marche est très rapide et la fusion d'un bloc de platine de 1 kilogramme est obtenue en un quart d'heure environ.

On sait que l'unité absolue de lumière est obtenue au moment de la solidification du platine; celle-ci est indiquée d'une manière précise par un éclair caractéristique qui se produit régulièrement et sûrement lorsqu'on emploie une masse de platine de 1 kilogramme environ; on ne peut pas s'attendre à la même régularité et à la même sûreté si la masse de platine est un peu faible. Cet éclair s'observe très bien directement; on le saisit encore mieux au photomètre en suivant les variations de la lumière émise par l'étalon jusqu'au moment où celui-ci émet son éclair; c'est le pointé fait à ce moment précis qui doit être compté. Ce dernier s'obtient d'ailleurs très sûrement avec un peu d'habitude, car on le contrôle instinctivement par la comparaison des observations faites immédiatement avant la solidification avec celles que l'on fait immédiatement après.

Le pointé effectué, il suffit de ramener le creuset sous le jet de flamme oxhydrique; la fusion complète est de nouveau obtenue au bout de quelques minutes et l'on peut procéder à une nouvelle mesure.

Une condition essentielle pour l'exactitude des mesures est la pureté absolue du métal en fusion et l'absence complète de poussières à la surface du métal liquide. Lorsque ces dernières se produisent, on les enlève soit mécaniquement soit par réduction chimique.

La grande importance de l'étalon au platine est une conséquence non seulement de sa constance et de son égalité de reproduction, mais aussi de la qualité de ses radiations lumineuses. Au point de vue de

la photométrie électrique en particulier, la composition de la lumière de l'étalon absolu est comparable à celle de la lumière des lampes à incandescence en régime normal et, quoique dans une moindre mesure, à celle de la lumière des lampes à arc.

L'étude photométrique de ces dernières ne peut être faite d'une manière exacte que si la composition de la lumière émise par la source de comparaison se rapproche suffisamment de l'arc voltaïque; c'est pourquoi l'étalon de platine sous la forme industrielle paraît appelé à rendre des services considérables à la photométrie électrique, d'autant plus que ce modèle d'appareil est encore susceptible de simplifications considérables.

Il suffit en effet d'appliquer à la fusion du platine les procédés de la fusion électrique pour simplifier non seulement l'appareil, mais surtout l'installation et la manipulation. Les électriciens se familiariseront beaucoup plus rapidement avec l'étalon au platine, s'ils ne sont pas forcés d'avoir recours à la fusion oxhydrique, car la fusion électrique peut s'effectuer rapidement et facilement avec les ressources de tout laboratoire électrotechnique bien outillé.

Comme la fusion électrique a lieu généralement à l'aide de courants très intenses, le plus simple serait d'employer le courant fourni par une batterie d'accumulateurs chargés en tension et déchargés en quantité.

Étalon Violle-Siemens.

108. M. W. Siemens a cherché à réaliser l'étalon légal de manière à satisfaire aux exigences de la pratique tout en se conformant autant que possible à la définition légale. Cependant, la simplification réalisée par M. Siemens l'a été aux dépens de l'exactitude, en ce sens que l'appareil ne répond pas exactement aux conditions auxquelles la conférence internationale s'est arrêtée.

Le platine est pris à son point de fusion et non à son point de solidification. On ne sait pas d'une façon certaine s'il existe pour le platine pur une différence entre le point de fusion et de solidification. Quant à la constance de la lumière émise à ce moment, elle n'est pas parfaitement démontrée; ainsi M. Cross a observé que l'intensité lumineuse est un peu plus grande si l'on emploie du platine recuit à plusieurs reprises; cette influence est insensible sur le point de solidification, ce qui est un argument de plus en faveur du procédé Violle.

Les figures 56 et 56 *bis* représentent une coupe horizontale et une coupe verticale de l'appareil; il est constitué essentiellement par une petite boîte métallique dont l'une des parois est percée d'une ouverture conique; la surface du plus petit cercle mesure exactement un dixième de centimètre carré. Immédiatement derrière cette fenêtre se trouve une

lame de platine très mince ($0^{mm},02$), d'une largeur de 5 à 6 millimètres, qui dépasse dans tous les sens le rebord de l'ouverture. On envoie à travers la lame de platine un courant électrique dont l'intensité va en croissant graduellement ; l'éclat de la lumière émise à travers l'ouverture conique augmente aussi graduellement jusqu'au moment où le platine fond et la clarté disparaît brusquement.

Cette augmentation progressive dans l'intensité permet à l'opérateur d'égaliser à chaque instant au photomètre les éclairements de la lampe que l'on étudie et de l'étalon au platine. La quantité de lumière émise par

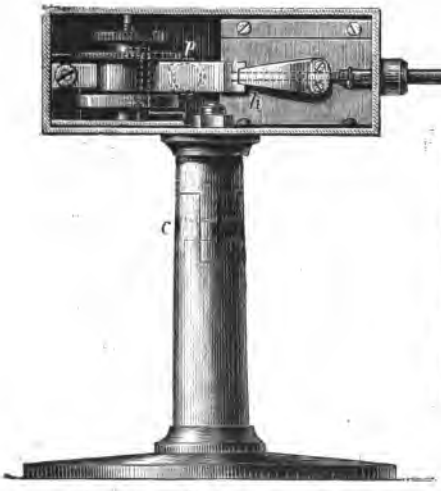


Fig. 56. — Étalon Violle-Siemens. Section verticale.

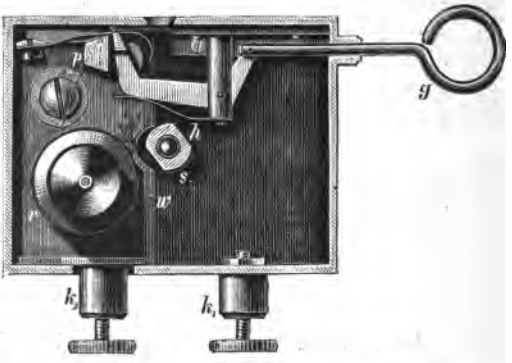


Fig. 56 *bis*. — Étalon Violle-Siemens. Section horizontale.

cet appareil, au moment de la fusion du platine, est égale au dixième de l'étalon absolu, c'est-à-dire à 0,2 carcel environ.

Le Congrès international des électriciens de 1889 ayant décidé de donner le nom de *bougie décimale* à la vingtième partie de l'unité absolue au platine, l'étalon Violle-Siemens a ainsi une intensité lumineuse égale à 2 bougies décimales.

Un mécanisme spécial, logé dans l'intérieur de la caisse et commandé par la poignée *g*, a pour but d'amener devant la fenêtre une nouvelle lame de platine à la place de celle qui vient d'être fondue; les expériences peuvent donc être répétées sans perte de temps.

M. Liebenthal (1), au cours d'une étude très approfondie de l'étalon Siemens, a modifié quelque peu l'appareil primitif; la petite boite en métal K porte la plaque métallique A, isolée du bâti, et sur laquelle se trouve

(1) *Lumière électrique*, vol. XXXI, p. 116.

le rouleau R formé par le ruban de platine ; cette plaque porte en outre le petit tambour directeur *m* mobile, et le cylindre directeur M de plus grandes dimensions et fixe ; l'une des bornes P de l'appareil est également reliée à cette plaque tandis que l'autre Q est fixée directement dans la paroi de la boîte métallique. Le ruban de platine, après avoir abandonné le cylindre R, passe sur les tambours *m* et M contre lesquels il est pressé par le ressort *f*, et devant l'ouverture D dont la superficie est de 0,1 centimètre carré exactement ; il est saisi ensuite par la pince Z ; une clef qui commande le tambour *m* permet de varier la tension du ruban de platine.

Le courant amené à la borne P entre dans le ruban de platine par le contact M surtout, puis il se rend par le ressort Z à la borne Q. Dès que le circuit est rompu par suite de la fusion du platine, on presse sur la tige *g*, ce qui pousse la pince mobile S sur la plaque A, et fait ouvrir la pince Z ; dès qu'on retire la tige *g* et la pièce mobile S, la pince Z se referme et entraîne une nouvelle portion de ruban de platine devant l'ouverture D.

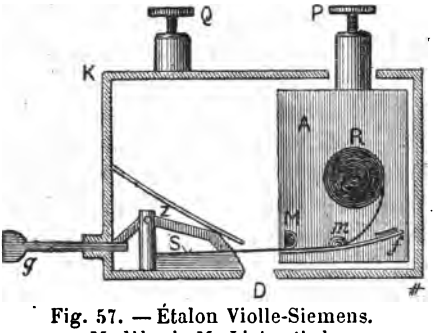


Fig. 57. — Étalon Violle-Siemens. Modèle de M. Liebenthal.

Cet appareil permet d'employer un ruban de platine très mince ; avec 1 gramme de métal, coûtant 3 francs environ, on peut faire 50 mesures.

Les premières mesures de M. Liebenthal donnèrent d'assez bons résultats ; mais des irrégularités assez grandes se produisirent bientôt, occasionnées par des irrégularités du ressort *f* qui n'appuyait plus que sur le tambour *m* ; la portion de ruban de platine traversée par le courant étant ainsi plus longue, la fusion avait lieu près de M et non pas vis-à-vis de l'ouverture D.

M. Liebenthal fut donc conduit à modifier un peu l'appareil ; la suppression du contact en M ou en *m* n'ayant pas donné de bons résultats, une simple vis, isolée de la boîte métallique et serrant le ruban de platine contre M, remplaça avantageusement la disposition primitive ; le tambour directeur *m* fut également supprimé, la tension du ruban pouvant être réglée suffisamment par la pince Z, et l'expérience ayant d'ailleurs montré que le degré de tension du ruban de platine n'avait qu'une influence très faible sur le pouvoir lumineux de la lampe. Pour obtenir de bons contacts, il fallut en outre revêtir le cylindre M d'une lame de platine ; avec ces modifications, l'appareil fonctionna dès lors aussi bien que possible.

En enroulant le platine autour du cylindre R, il faut avoir soin d'éviter

de plier le ruban, car la moindre cassure déplace le point de fusion et modifie la lumière émise.

L'augmentation d'intensité du courant produit d'abord une augmentation rapide de l'intensité lumineuse; elle devient plus lente à mesure qu'on s'approche du moment de la fusion; la fusion se produit enfin subitement et l'obscurité a lieu. Le dernier pointé photométrique qui est fait avant l'extinction est seul valable.

M. Liebenthal a effectué un certain nombre de comparaisons avec la lampe à acétate de von Hefner en prenant pour cette dernière toutes les précautions énumérées précédemment et en employant un liquide soigneusement rectifié.

Il a trouvé que l'écart moyen d'une comparaison photométrique entre la lampe à acétate et l'étalon au platine est de 2,9 p. 100, tandis que d'autres mesures ont donné 0,9 p. 100 pour l'écart moyen des comparaisons de deux lampes à acétate.

Ces variations, comme le fait d'ailleurs remarquer avec justesse M. Liebenthal, ne résultent pas uniquement de variations réelles aussi considérables dans l'intensité lumineuse de l'étalon au platine, provenant par exemple de variations dans la structure moléculaire et dans le pouvoir émissif du métal; elles proviennent en grande partie de la différence de couleur des deux sources de lumière. Au moment de la fusion, l'étalon au platine émet une lumière beaucoup plus blanche que celle de la lampe à acétate; les mesures sont alors affectées de toutes les causes d'erreur qui rendent si difficile la comparaison des deux sources lumineuses des couleurs différentes.

L'intensité lumineuse de l'étalon de platine en fonction de la lampe à acétate a été aussi déterminée à plusieurs reprises par M. Liebenthal; il a trouvé que 1 Violle-Siemens = 1,757 Hefner.

Quels que soient les mérites de l'étalon Siemens et l'ingéniosité des détails de l'appareil, il est important de ne pas perdre de vue deux défauts principaux.

L'observateur doit effectuer le pointé au moment précis où la fusion a lieu; or, à ce moment même, l'émission de lumière cesse brusquement.

Le pointé photométrique doit donc se faire pour ainsi dire au vol.

En outre, l'étalon Siemens ne reproduit pas exactement le dixième de l'étalon absolu Violle; car l'observation se fait au moment de la fusion du platine et non à celui de la solidification, ce qui peut produire des différences assez considérables au point de vue de la quantité de lumière émise; il suffit en outre que la section du ruban ne soit pas absolument uniforme et que le métal soit peu homogène pour produire des variations très sensibles.

109. Voici pour terminer un tableau à double entrée et qui résume

toutes les comparaisons des divers étalons photométriques effectuées par M. Violle.

	UNITÉS VIOLLE.	CARCELS.	BOUGIES de l'Étoile.	BOUGIES allemandes.	BOUGIES anglaises.	LAMPES von Hefner-Alteneck.
Unités Violle	1.000	2.08	16.1	16.4	18.5	18.9
Carcels	0.481	1.00	7.75	7.89	8.91	9.08
Bougies de l'Etoile	0.062	0.130	1.00	1.02	1.15	1.17
— allemandes	0.061	0.127	0.984	1.00	1.13	1.15
— anglaises	0.054	0.112	0.870	0.886	1.00	1.02
Lampe Hefner	0.053	0.114	0.853	0.869	0.98	1.00

CHAPITRE IV

INSTALLATIONS GÉNÉRALES ET APPAREILS AUXILIAIRES DE LA PHOTOMÉTRIE PRATIQUE

110. Les chapitres précédents ont été consacrés à l'étude des appareils photométriques et des unités de mesure. Il reste à examiner quelle est la meilleure manière de les disposer pour les mesures et quelles sont les précautions à prendre pour obtenir une précision satisfaisante.

Salle de photométrie.

111. Dans tout laboratoire où l'on veut procéder à des mesures photométriques, il faut y consacrer un local spécial, choisi judicieusement et satisfaisant aux conditions fondamentales suivantes.

La salle de photométrie doit être d'assez grandes dimensions. C'est une grave erreur de concentrer les appareils photométriques dans une petite pièce, surtout si l'on a recours à des étalons photométriques basés sur la combustion, lampes Carcel, Hefner, à pétrole, bougies, etc.

L'intensité lumineuse de ces étalons photométriques varie beaucoup avec le degré de pureté de l'air ambiant; elle diminue à mesure que la teneur de l'air en acide carbonique augmente. Au bout d'une heure les produits de la respiration de deux personnes, par exemple, suffisent à vicier l'air d'une salle assez grande, de manière à produire une diminution très sensible de l'intensité lumineuse. En outre, la présence des foyers lumineux détermine une élévation de température qui contribue à rendre les mesures moins exactes, par la fatigue qu'elle occasionne à l'observateur. On ne peut remédier qu'imparfaitement aux petites dimensions d'une salle de photométrie, en installant un système de ventilation un peu intense. Il ne faut pas songer à faire fonctionner ces appareils pendant les mesures elles-mêmes, car les étalons photométriques doivent être à l'abri du plus petit courant d'air. On doit donc y avoir recours dans l'intervalle des mesures, ce qui produit chaque fois une perturbation dans le régime de la lampe étalon. On ne sait plus alors si l'intensité lumineuse de celle-ci revient à sa valeur primitive.

La salle de photométrie doit avoir ses parois peintes en noir mat et on

doit pouvoir y faire l'obscurité complète. Cette condition est indispensable afin que l'écran photométrique ne reçoive que la lumière des deux foyers que l'on compare. Elle permet en outre à l'œil de se reposer dans l'intervalle des mesures.

La lumière nécessaire à la lecture des appareils et à l'inscription des observations doit être fournie par des lampes de faible intensité, munies de réflecteurs qui empêchent la diffusion de la lumière dans la salle.

Pendant le pointé photométrique, l'observateur doit être à l'abri des rayons lumineux provenant directement des deux sources. On peut utiliser dans ce but des écrans ou un voile noir analogue à celui dont se servent les photographes; ce dernier a cependant l'inconvénient d'incommoder l'observateur, par suite de l'élévation de température qu'il occasionne.

Erreurs personnelles.

112. Comme toutes les mesures dans lesquelles l'observateur intervient directement, les mesures photométriques sont affectées d'erreurs personnelles qui peuvent être assez considérables. D'une manière générale, l'erreur personnelle est d'autant plus faible que le phénomène observé est précis et ne peut donner lieu à une hésitation de la part de l'observateur. Dans les mesures photométriques, la constatation de l'égalité des éclairements des deux plages de l'écran dépend énormément de l'appréciation de l'observateur, surtout lorsqu'il y a des différences de teintes. Il doit en résulter des erreurs personnelles sensibles; c'est ce qui a été constaté aussitôt que l'exactitude des mesures photométriques l'a permis. Ce fait n'a été constaté d'une manière précise que récemment par M. Nichols (1). Voici le procédé suivi par ce physicien, procédé qui peut servir d'exemple pour des recherches de ce genre.

Trois lampes à incandescence de 16 bougies et 110 volts, choisies de manière à posséder autant que possible la même intensité lumineuse, sont mises en dérivation sur une batterie d'accumulateurs de 120 volts, la dérivation partant de l'extrémité d'un rhéostat réglant l'intensité du courant.

Une des lampes L_1 étant prise comme étalon, on lui compare successivement les deux autres L_2 et L_3, de manière à obtenir le rapport des intensités lumineuses $\frac{I_2}{I_3}$. On trouve, par exemple, de cette manière :

$$\frac{I_2}{I_3} = 1{,}0032 \pm 0{,}0015.$$

Ensuite, en conservant toujours la même intensité du courant alimentant les lampes, on a déterminé le rapport I_2/I_3 en comparant directe-

(1) *Lumière électrique*, vol. XXXIII, p. 414.

ment les intensités lumineuses de ces deux lampes, la lampe L_2 étant placée à droite, la lampe L_3 à gauche de l'écran.

Pour éviter les erreurs produites par de faibles variations de l'intensité des courants, on a fait donner aux lampes étudiées 12 bougies au lieu de 16, car, à cette intensité, les variations du courant se font beaucoup moins sentir sur l'intensité lumineuse.

Les rapports I_2/I_3 ont été déterminés par dix observateurs différents; le tableau suivant donne les valeurs obtenues de cette manière ainsi que l'erreur personnelle correspondante, celle-ci étant calculée en admettant comme valeur réelle de I_2/I_3 la valeur de 1,0032 obtenue par double comparaison. Chaque chiffre est la moyenne des résultats de 10 mesures différentes; on a déterminé l'erreur probable de cette moyenne :

Observateur.	Valeur de $\frac{I_2}{I_3}$.	Erreur personnelle.
A	1,0590 ± 0,0010	— 0,0558
B	0,9701 ± 0,0044	+ 0,0331
C	1,0021 ± 0,0022	— 0,0189
D	1,0191 ± 0,0072	— 0,0159
E	1,0182 ± 0,0039	— 0,0150
F	1,0902 ± 0,0057	— 0,0870
G	1,0733 ± 0,0053	— 0,0701
H	1,0293 ± 0,0042	— 0,0261
I	1,0297 ± 0,0050	— 0,0263
J	1,0220 ± 0,0027	— 0,0188

On voit donc que le rapport I_2/I_3 a été trouvé par tous les observateurs, à l'exception d'un seul, plus grand que la valeur 1,0032 obtenue par la comparaison indirecte qui élimine les erreurs personnelles. L'erreur personnelle des dix observateurs qui ont pris part aux mesures a donc varié entre — 0,0870 et + 0,0331, c'est-à-dire entre — 8 p. 100 et + 5 p. 100.

113. Ces mesures ont été faites à l'aide du photomètre de Bunsen muni des deux miroirs latéraux de Rüdorff. L'observateur regardait les deux images de la tache avec les deux yeux, l'image de gauche avec l'œil gauche et l'image de droite avec l'œil droit.

M. Nichols admet que dans ce cas l'erreur personnelle provient, en grande partie, d'une différence de sensibilité des yeux de l'observateur; celui-ci estime alors que l'écran est à une distance trop grande de la lampe dont les rayons tombent directement sur le côté de la tache qui est observé par l'œil le plus sensible. D'après cette explication, l'œil droit aurait été plus sensible que l'œil gauche pour les neuf observateurs qui ont une erreur personnelle négative, tandis que l'inverse aurait eu lieu pour le dixième observateur (B).

On fit ensuite des observations avec un seul œil, l'autre étant recouvert d'un bandeau; ces observations étaient rendues plus pénibles, mais par contre beaucoup plus sûres, ainsi que l'observateur en avait d'ailleurs

conscience. En outre, les résultats obtenus avec l'œil gauche étaient identiques à ceux fournis par l'œil droit. C'est ainsi que les valeurs obtenues par les observateurs A et B, qui différaient d'abord de 8 p. 100, sont absolument concordantes lorsqu'ils n'utilisent qu'un œil pour les observations.

Voici, par exemple, quelques chiffres significatifs :

Observateur.	Œil.	$\frac{I_2}{I_3}$.	Erreur personnelle.
A	Droit.	1,0028 ± 0,0010	0,0004
A	Gauche.	1,0001 ± 0,0019	0,0031
B	Droit.	1,0001 ± 0,0017	0,0031
B	Gauche.	1,0031 ± 0,0018	0,0001

Ce qui précède montre donc que l'erreur personnelle est loin d'être une quantité négligeable en photométrie; le seul moyen d'y remédier est d'employer des photomètres qui permettent les observations monoculaires.

Le banc photométrique.

114. Dans l'étude du photomètre de Foucault (§ 20), nous avons décrit l'installation complète et les appareils de mesure et de réglage des distances d_1 et d_2 des foyers à l'écran. Nous avons fait de même pour le photomètre de Bunsen (§ 24).

Il convient cependant de compléter ces renseignements, car le banc photométrique est un organe essentiel commun à la plupart des nombreux appareils photométriques que nous avons décrits dans le second chapitre.

Le banc photométrique est un banc d'optique d'une construction robuste et soignée. Il a pour but de permettre la mesure des distances d_1 et d_2 de l'écran aux deux foyers lumineux. Il porte une division millimétrique sur laquelle on lit les déplacements de l'écran.

Dans la plupart des cas, les deux luminaires qu'on compare sont placés à demeure aux extrémités du banc et le pointé s'effectue en déplaçant l'écran seulement. Ce procédé est le plus avantageux car l'observateur règle à volonté les déplacements de l'écran de manière à obtenir le pointé le plus précis.

L'intensité de l'étalon étant I_1, celle du foyer étudié I_2, on a la relation :

$$I_2 = \frac{d_2^2}{d_1^2} I_1.$$

La longueur du banc photométrique étant représentée par l et la distance d_1 de l'écran à l'étalon par x, on a :

$$d_2 = (l - x)$$

et la relation précédente devient :

$$I_2 = \frac{(l-x)^2}{x^2} I_1.$$

Il est avantageux de calculer, pour la longueur l du banc photométrique employé, une table des valeurs du quotient $\frac{(l-x)^2}{x^2}$. On peut calculer cette table pour des valeurs de x variant de millimètre en millimètre dans les régions les plus fréquemment usitées du banc.

115. La table des valeurs du coefficient $\frac{x^2}{(l-x)^2}$ rend de grands services dans le contrôle photométrique des lampes à incandescence. On sait qu'il faut déterminer pour chaque lampe le voltage qui correspond réellement à l'intensité lumineuse nominale. Les lampes sont alors classées suivant leur voltage.

On emploie comme étalon photométrique une lampe à incandescence dont on maintient le voltage constant et dont on connaît exactement l'intensité lumineuse correspondante. Admettons que la lampe à étudier doive donner une intensité lumineuse de I_2 bougies. Cette intensité sera réellement atteinte lorsque l'écran occupera sur le banc photométrique la division x déterminée à l'aide de la relation

$$I_2 = \frac{(l-x)^2}{x^2} I_1,$$

d'où

$$\frac{l-x}{x} = \sqrt{\frac{I_2}{I_1}}$$

$$x = \frac{l}{1+\sqrt{\frac{I_1}{I_2}}}.$$

Un exemple suffira à montrer l'usage de cette formule.

Supposons que l'étalon I_1 donne 12 bougies à 65 volts. Quelle position faut-il donner à l'écran pour que la lampe à étudier donne 16 bougies au moment où le pointé photométrique est exact?

Admettons qu'on ait $l = 300$ cm., ce qui est une valeur très pratique. On aura :

$$x = \frac{300}{1+\sqrt{\frac{16}{12}}} = \frac{300}{1+1,15} = 139,5 \text{ cm.}$$

On peut calculer une table pour x en fonction du rapport $\frac{I_2}{I_1}$ et pour la longueur du photomètre qu'on utilise.

Voici par exemple une table de ce genre calculée pour $l = 300$ cm. On entre dans la table, dans les 10 colonnes verticales de droite, et on obtient le nombre des dizaines de x dans la première colone verticale, et celui des unités dans la première colonne horizontale. Dans l'exemple numérique précédent on avait $\frac{I_2}{I_1} = \frac{16}{12} = 1,33$. En entrant avec 1,33 dans la table, on obtient $x = 139,3$.

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	25.0	23.8	22.7	21.7	20.8	19.8	19.0	18.2	17.4	16.7
60	16.0	15.4	14.7	14.2	13.6	13.1	12.6	12.1	11.6	11.2
70	10.8	10.4	10.0	9.7	9.3	9.00	8.69	8.39	8.10	7.83
80	7.56	7.31	7.07	6.84	6.61	6.40	6.19	5.99	5.80	5.62
90	5.44	5.27	5.11	4.95	4.80	4.66	4.52	4.38	4.25	4.12
100	4.00	3.88	3.77	3.66	3.55	3.44	3.35	3.25	3.16	3.07
110	2.98	2.90	2.82	2.74	2.66	2.59	2.52	2.45	2.38	2.31
120	2.25	2.19	2.13	2.07	2.01	1.96	1.91	1.85	1.80	1.76
130	1.71	1.66	1.62	1.58	1.53	1.49	1.45	1.42	1.38	1.34
140	1.306	1.271	1.238	1 205	1.173	1.142	1.113	1.083	1.055	1.027
150	1.000	0.974	0.948	0.923	0.899	0.875	0.852	0.830	0.808	0.787
160	0.765	0.745	0.726	0.706	0.688	0.669	0.652	0.634	0.617	0.601
170	0.585	0.569	0.554	0.439	0.524	0.510	0.496	0.483	0.470	0.457
180	0.444	0.432	0.420	0.409	0.397	0.386	0.376	0.365	0.355	0.345
190	0.335	0.326	0.316	0.307	0.298	0.290	0.282	0 273	0.265	0.258
200	0.250	0.243	0.235	0.228	0.221	0.215	0.208	0.202	0.196	0.190
210	0.184	0.178	0.172	0.167	0.161	0.156	0.151	0.146	0.141	0.137
220	0.132	0.128	0.123	0.119	0.115	0.111	0.107	0.104	0.100	0.096
230	0.093	0.089	0.086	0.083	0.080	0.076	0.074	0.071	0.068	0.065
240	0.063	0.060	0.057	0.055	0.053	0.050	0.048	0.046	0.044	0.042
250	0.04	0.038	0.036	0.035	0.033	0.031	0.030	0.028	0.027	0.025

112. Voici pour terminer la description du banc photométrique de l'Institut physico-technique de Berlin, qui a été utilisé pour les recherches de MM. Lummer et Brodhun.

Il se compose de deux barres d'acier de plus de 2 mètres de longueur; ces rails ont une épaisseur de 25 mm. et une hauteur de 50 mm. La distance entre ces deux barres parallèles est de 100 mm. environ. Dans ces conditions, une flexion du banc n'est pas à craindre. Sur la face supérieure des barres roulent trois chariots munis de roues; le mouvement de ces chariots est très doux et très facile. Ils peuvent être arrêtés à l'aide d'un levier dans n'importe quelle position sur le banc. Chacun d'eux porte un vernier qui permet de lire $0^{mm},3$ environ sur la division millimétrique gravée sur la face supérieure de l'une des barres.

La carcasse de chaque chariot est formée par une plaque métallique assez épaisse, percée d'un trou dans lequel on peut déplacer verticalement un tube d'acier sur lequel on fixe la boîte photométrique et les supports des foyers lumineux. On a soin de régler le vernier des chariots de manière à faire coïncider son zéro avec l'axe du tube vertical.

En outre le chariot de la boîte photométrique possède un dispositif qui permet de le déplacer rapidement de 2 à 3 cm., ce qui est indispensable pour vérifier l'exactitude du pointé photométrique.

Les bancs destinés aux mesures industrielles ne doivent pas être nécessairement construits avec autant de soin; mais il faut cependant qu'ils puissent satisfaire avec assez de précision aux principales conditions énumérées ci-dessus.

Installation du laboratoire de photométrie.

113. On ne peut pas donner de prime-abord les plans et les détails de l'installation d'un laboratoire de photométrie, car ils dépendent trop du but dans lequel le laboratoire est créé. Il y a à cet égard une différence fondamentale entre un laboratoire de recherches ou d'enseignement et un laboratoire industriel de contrôle. Nous ne nous occuperons du premier type que pour mentionner quelques installations remarquables.

Un des premiers laboratoires de photométrie électrique créé de toutes pièces suivant un plan déterminé est celui qui a servi aux essais du Comité d'expériences de l'Exposition d'électricité de Munich, en 1882. La figure 58 donne la disposition des appareils. AB et BC sont deux bancs photométriques de 6 et 12 mètres de longueur sur lesquels on peut déplacer les écrans Bunsen *a*, *b*. L'étalon adopté fut la bougie, avec divers autres étalons intermédiaires, savoir le bec-bougie Giroud figuré en II, contrô-

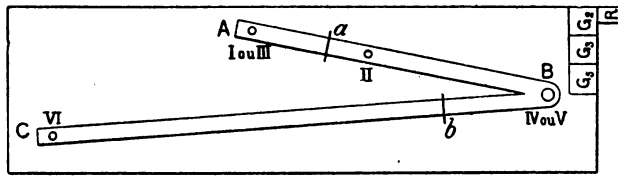


Fig. 58. — Salle de photométrie de l'Exposition de Munich.

lant un bec Argand en III, et un bec intensif Siemens représenté en V. Le bec Argand servait à la mesure des lampes à incandescence placées en IV et le bec intensif Siemens à celle des lampes à arc placées en VI. L'alimentation des trois brûleurs à gaz était contrôlée par les trois compteurs G_1, G_2, G_3 réglés par le régulateur général R.

La bougie étalon est placée en II, la lampe à incandescence en I et une lampe à pétrole de grand calibre occupe la place du brûleur intensif Siemens en V.

La disposition des divers étalons intermédiaires commande l'ordre dans lequel on doit effectuer les mesures. On compare d'abord le bec-bougie II avec la bougie I, puis le bec-bougie II avec le brûleur Argand III et enfin celui-ci avec la lampe à incandescence IV. Les foyers lumineux II, III, IV, brûlent pendant toute la durée des mesures. On les masque par un écran quand ils ne sont pas utilisés.

Pour mesurer l'intensité du foyer à arc dans une inclinaison quelconque, on fixe à l'extrémité C du banc photométrique un miroir mobile autour d'un axe horizontal. La lampe VI est alors ramenée à des hauteurs bien déterminées, correspondant aux inclinaisons de 15°, 30°, etc., de manière

que les rayons lumineux soient réfléchis par le miroir parallèlement à l'axe du photomètre.

Ce qui frappe dans cette installation, c'est le nombre des étalons intermédiaires fournis par les brûleurs à gaz. Actuellement on aurait plutôt recours à des lampes à incandescence.

L'installation du laboratoire de l'Exposition d'électricité de Vienne, en 1883, ne diffère de celle de Munich que par la suppression des brûleurs à gaz employés comme étalons intermédiaires.

A Philadelphie, le Comité de l'Institut Franklin a employé avec le plus grand succès l'écran Methwen (fig. 48) combiné avec le brûleur-type Argand, tandis qu'à Anvers, comme à Paris en 1881, on a eu recours à la lampe Carcel. Pour les lampes à arc, on a utilisé à Anvers un bec intensif Siemens comme étalon intermédiaire.

La figure 59 montre l'installation de la salle de photométrie utilisée par le Comité d'essais d'Anvers. Cette salle était divisée par une cloison BBB formée d'une draperie noire. Le banc photométrique P servait à comparer la lampe à arc L au bec Siemens placé en S; un second banc disposé en P′ permettait de mesurer l'intensité du bec Siemens en fonction de l'étalon Carcel. Les observations se faisaient simultanément aux deux appareils.

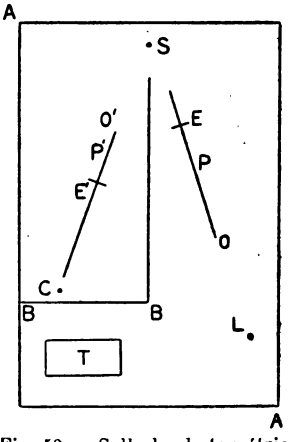


Fig. 59. — Salle de photométrie de l'Exposition d'Anvers.

Au nombre des laboratoires de photométrie les mieux outillés, il faut citer celui que M. D. Monnier a installé en 1883 pour le compte de l'Association pour l'étude de l'électricité, constituée par les principales compagnies françaises du gaz. La partie photométrique de ce laboratoire est pourvue des appareils les plus récents.

Un laboratoire industriel de contrôle ne comporte pas nécessairement tous les appareils d'un laboratoire d'étude ou d'enseignement, mais le plan général reste le même que celui qui est donné ci-dessus, si l'on doit pouvoir contrôler à la fois l'intensité lumineuse des foyers à arc. Si le contrôle est restreint aux lampes à incandescence, l'installation peut être considérablement simplifiée.

Le choix de l'écran photométrique est très important. Jusqu'à maintenant c'est l'écran Foucault et l'écran Bunsen qui ont eu la préférence. Mais l'écran Lummer et Brodhun leur est bien supérieur et doit être adopté pour autant que cela est possible.

Quant aux appareils auxiliaires, il y a lieu de faire le choix entre ceux dont la description va suivre.

Photomètre radial de Dibdin.

114. Les lampes à arc et à incandescence émettent des quantités de lumière variables avec la direction des rayons lumineux. Cette variation est beaucoup plus grande avec ces foyers qu'avec les foyers à gaz ordinaires. Aussi est-il de la plus haute importance de mesurer l'intensité d'une source de lumière dans une direction quelconque.

Cette importance a été signalée, pour la première fois, par M. Allard dans son mémoire sur l'intensité et la portée des phares.

Le premier procédé qui se présente à l'esprit est d'orienter le banc photométrique entier de manière à le placer dans la direction des rayons lumineux. C'est ce qu'ont réalisé MM. Ayrton et Perry (§ 36) dans leur photomètre à dispersion. Le photomètre de Weber (§ 50) réalise aussi cette condition.

L'appareil, étant mobile autour d'un axe vertical, peut être orienté dans un azimut quelconque; quant au tube qui sert à pointer le foyer à étudier, il est mobile autour d'un axe horizontal, de sorte qu'on peut l'orienter sous une inclinaison également quelconque.

On peut cependant employer les écrans ordinaires, l'écran de Bunsen par exemple, pour la mesure des rayons lumineux inclinés, en tenant compte du fait que l'éclairement de l'écran ne dépend pas seulement de la distance des foyers lumineux, mais aussi de l'angle d'incidence des rayons qui tombent sur l'écran. Il faut naturellement tenir compte aussi de la perte de lumière produite par l'absorption et la réflexion; cette perte augmente avec l'incidence des rayons lumineux.

M. Dibdin a trouvé, par exemple, qu'elle était pour l'écran Bunsen qu'il employait:

De 5	p. 100	pour un	angle d'incidence de	22 1/2	degrés.
12	—	—	—	45	—
68	—	—	—	67 1/2	—

Malheureusement ces nombres n'ont de valeur que pour l'écran particulier de Dibdin, et doivent être déterminés à nouveau dans chaque cas particulier.

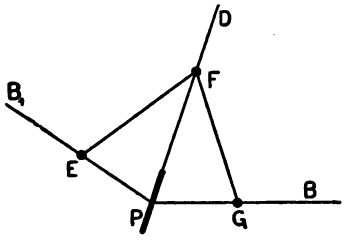
On peut éliminer cette correction en disposant le banc photométrique de manière que les rayons frappent les deux côtés de l'écran sous la même incidence. Hartley (1) a proposé, le premier, de rendre l'écran mobile autour d'un axe, de manière à le placer toujours dans le plan bissecteur du dièdre formé par les deux foyers lumineux et le photomètre.

(1) *La Lumière électrique*, vol. X, p. 58.

M. Dibdin a réalisé cette disposition dans le photomètre radial (1) dont les figures 60 et 61 donnent la disposition.

Sur un socle horizontal reposent deux tiges verticales; la tige T_1 est fixe et porte, sur un chariot mobile dans une glissière, le foyer lumineux à étudier F. La tige T_2 qui peut être déplacée horizontalement supporte en P l'écran photométrique.

Les deux tiges portent en outre deux bras articulés en O_1 et O_2, en O_1 se trouve un cercle divisé en degrés. Le bras B_1 est muni d'un index qui marque sur le cercle divisé O_1 l'angle que font avec l'horizontale les rayons lumineux de F qui tombent sur l'écran photométrique. En O_2 se trouve en outre un secteur divisé en demi-degrés, mais dont les divisions sont numérotées de degrés en degrés; pour faire une mesure, on place l'index de l'écran sur la division de



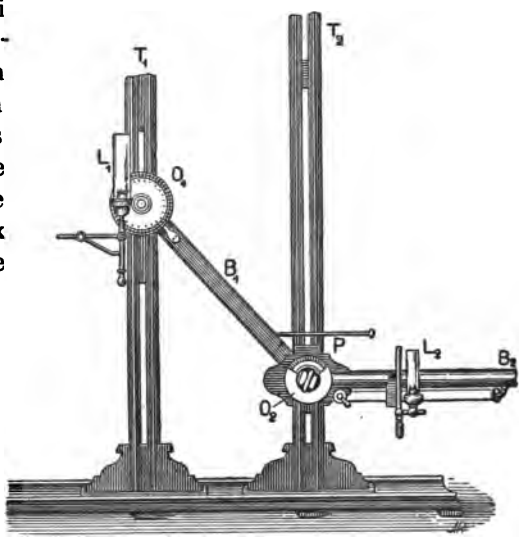


Fig. 60 et 61. — Photomètre de Dibdin.

O_2 qui correspond au nombre lu sur O_1. L'étalon photométrique se place en E, et il peut être déplacé à volonté sur le bras divisé B_2. La longueur du bras B_1 étant constante, la distance du foyer lumineux F et de l'écran P est invariable, en sorte qu'on peut graduer le bras B_2 directement, en bougies par exemple.

On peut simplifier le photomètre radial de Dibdin en rendant l'écran solidaire des mouvements de B_1 et B_2, de manière qu'il se place toujours dans le plan bissecteur de l'angle formé par B_1 et B_2. Cette simplification est réalisée dans l'appareil représenté par la figure précédente à l'aide des articulations EF et GF. On peut alors supprimer le secteur gradué O_1.

(1) *La Lumière électrique*, vol. XXX, p. 227.

Photomètre radial de Rousseau.

115. A l'occasion des mesures photométriques des lampes à arc expo-

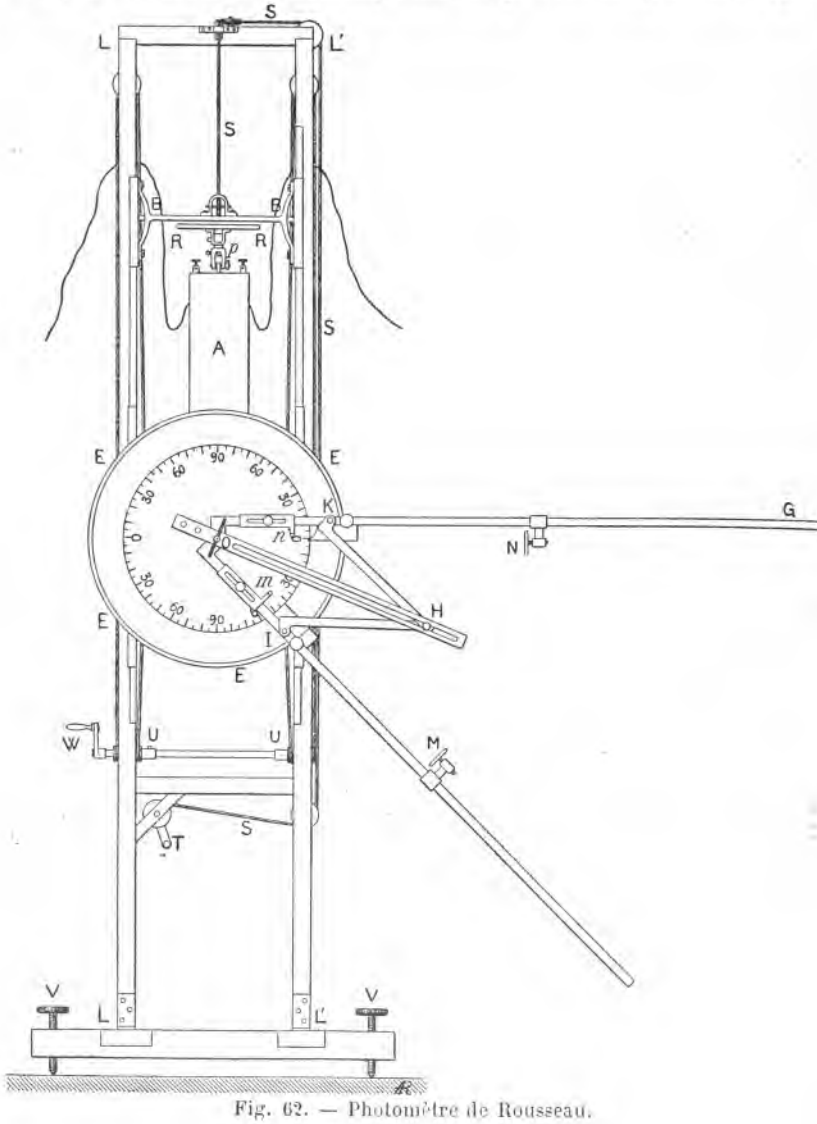


Fig. 62. — Photomètre de Rousseau.

sées à Anvers en 1885, M. Rousseau (1) a imaginé un appareil qui se rapproche sensiblement de celui de Dibdin, mais qui comporte l'emploi

(1) Comptes rendus des travaux du Comité international des essais électriques de l'Exposition d'Anvers, p. 85.

du photomètre de Rumford. Voici la description de cet appareil (fig. 62).

La lampe A est suspendue entre deux montants et un mécanisme actionné par la manivelle W permet de la monter ou de la baisser. A ces montants se trouve également fixé un cadre circulaire E; du centre de ce cadre partent deux règles, l'une horizontale G, l'autre inclinée F, portant chacune un miroir mobile N et M. Au centre du cadre E se trouve un écran blanc O porté sur la règle OH; cette règle forme une des diagonales d'un quadrilatère articulé OKHL, de telle façon que l'écran O fasse toujours des angles égaux avec la direction des règles G et F.

Lorsqu'on veut se servir de cet appareil, on place la lampe A derrière le cercle gradué E, de telle façon que le foyer se trouve en regard du centre O et à une distance aussi petite que le comporte la forme de la lampe étudiée. La lumière émise par ce foyer est réfléchie par les miroirs M et N (coupés dans la même glace) et ils projettent sur l'écran blanc O les ombres de deux tiges *m* et *n* fixées également sur les règles G et F. L'un des miroirs étant fixe, on fait avancer ou reculer l'autre jusqu'à ce qu'on obtienne l'égalité des ombres projetées.

M. Krüss a construit un modèle du photomètre de Rousseau combiné avec un écran de Bunsen à l'usage de ceux qui préfèrent ce dernier photomètre à celui de Rumford. Ce modèle est combiné avec beaucoup de soin; il possède, en particulier, un dispositif qui permet de vérifier rapidement si le foyer à arc voltaïque est bien centré par rapport à l'appareil.

Holophotomètre de M. Vernon-Harcourt.

116. Cet appareil (1) est basé sur l'emploi de l'écran de Bunsen combiné avec un système de miroirs, étudié de manière à éviter les erreurs provenant des mouvements que l'on fait subir aux foyers qu'on compare. Ce qui caractérise cet appareil, c'est que la lampe à mesurer et le système de miroirs ne sont pas placés sur le banc photométrique, mais sur une table ou sur des supports indépendants; l'écran seul est mobile sur le banc photométrique.

L'appareil se compose de deux miroirs dont l'un, le plus grand (fig. 63), est fixé à frottement dur à l'extrémité d'un axe horizontal porté par un support B; le centre du miroir correspond au centre de l'axe, mais le miroir peut être incliné d'un angle quelconque. Cet axe est disposé à la hauteur de l'écran de Bunsen et dans la direction de l'axe du photomètre. A l'autre extrémité de cet axe (qui n'est pas visible sur la figure) est articulé un bras à coulisse portant à l'extrémité un petit miroir. D'après cette disposition, on voit que les deux miroirs tournent toujours ensemble autour de l'axe du photomètre, et ces rotations sont

(1) *La Lumière électrique*, vol. XXIX, p. 286.

lues sur le disque divisé qui sert, en outre, d'écran, et empêche les rayons directs de la lampe à étudier de tomber sur l'écran de Bunsen.

Les figures 63 et 64 montrent l'appareil disposé pour la mesure des rayons horizontaux de la lampe L, placée derrière et masquée par le cercle divisé. La figure 65 montre la disposition de l'appareil pour la mesure des rayons verticaux. Il est évident, d'après la construction, que lorsqu'on a une fois ajusté le rayon lumineux dans l'axe du photomètre,

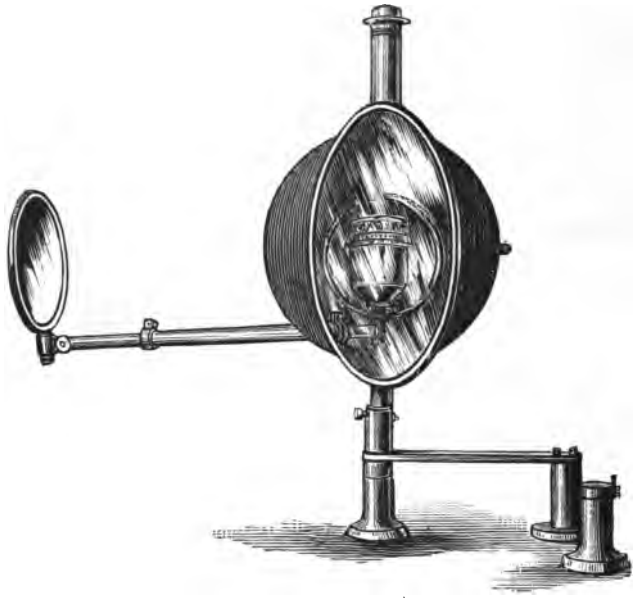


Fig. 63. — Holophotomètre de Vernon-Harcourt.

il y restera pour toutes les positions du bras A, entraînant avec lui l'axe horizontal du miroir M.

On peut ainsi faire toutes les mesures *relatives* de l'intensité lumineuse sous un angle donné; pour faire une mesure absolue, on commence par comparer la lampe L en retirant le système des deux miroirs, ce qui est très facile d'après la disposition du support, puis on fait la mesure avec les miroirs pour les rayons horizontaux; on a ainsi le facteur de réduction par lequel il faut multiplier les intensités trouvées pour compenser l'absorption; il faut naturellement tenir compte dans les mesures de l'augmentation de la distance produite par les diverses réflexions du rayon lumineux.

Des mesures préliminaires ont indiqué que l'absorption par les deux miroirs n'est que de 1,8 p. 100.

Dispositif de M. Millis.

M. Millis a remplacé le miroir réflecteur par un prisme à réflexion totale, tout en conservant le banc photométrique usuel et l'écran de Bunsen.

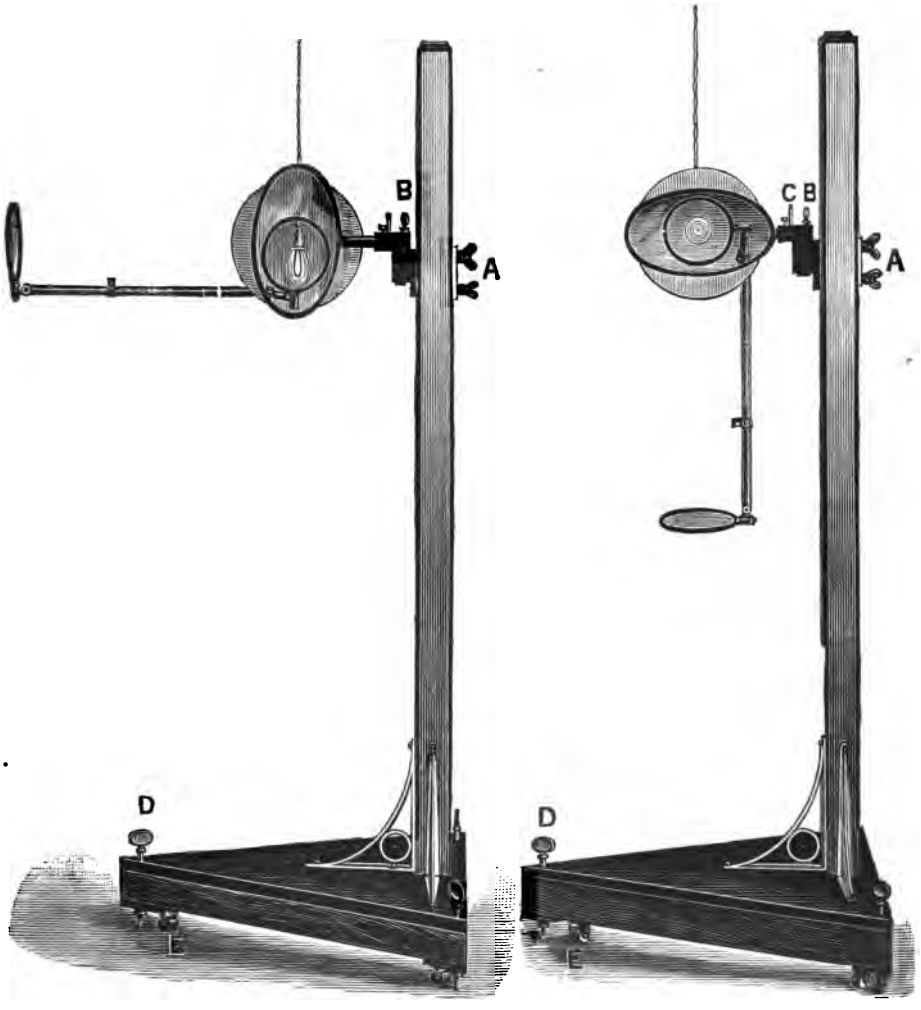


Fig. 64 et 65.

La figure 66 montre la disposition générale des appareils, en plan et en élévation. La lampe électrique est placée sur son support en *bb'* tandis qu'en *p*, *p* se trouve un prisme à réflexion totale.

Ce prisme est monté à l'extrémité d'un tube en cuivre fixé sur un

trépied ; le tube est muni d'un fil à plomb. Il faut que les faces perpendiculaires du prisme soient suffisamment grandes (13 centimètres carrés au minimum). Le prisme est mobile autour de trois axes qui se coupent tous au même point qui est le milieu de l'arête principale; grâce à cette disposition ce point reste fixe, malgré les rotations diverses qu'on donne au prisme au moyen de vis. Une tige pointue peut être placée de telle façon que, lorsqu'on la met à la place du prisme, sa pointe occupe exactement le point où se trouvait le milieu de l'arête principale de ce dernier.

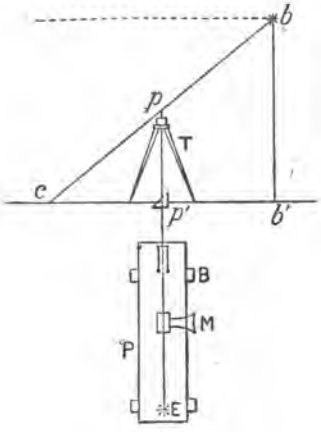


Fig. 66.

Pour procéder aux mesures, on marque d'abord le pied b' de la verticale menée par la lampe, et on porte sur une droite une longueur $b'c$ déterminée par l'angle sous lequel on veut mesurer l'intensité lumineuse de la lampe. On tend ensuite une ficelle du point b au point c et on déplace le trépied muni de la pointe en cuivre fixée dans le support, jusqu'à ce que cette pointe touche la ficelle. Du point p' indiqué par le fil à plomb on mène une perpendiculaire à $b'c$, et on dispose le banc photométrique de manière que son axe coïncide avec cette perpendiculaire.

Il faut régler le prisme, jusqu'à ce que les rayons lumineux qui viennent du foyer à étudier soient renvoyés parallèlement au banc photométrique. On doit aussi déterminer la correction à appliquer aux mesures pour tenir compte de l'absorption de la lumière par le prisme.

Emploi des miroirs.

118. Les appareils précédents permettent de faire les comparaisons photométriques sous un angle quelconque. Il n'est cependant pas absolument nécessaire d'avoir recours à des appareils spéciaux; le plus souvent, on peut se contenter du banc photométrique ordinaire, en ayant soin d'employer un miroir renvoyant en direction horizontale sur l'écran les rayons lumineux du foyer que l'on étudie. C'est le procédé qui a été, par exemple, adopté par le comité d'essais de Munich.

Il faut que le miroir soit mobile autour d'un axe horizontal et que son inclinaison puisse être facilement mesurée sur un cercle divisé. Les rayons lumineux provenant du foyer faisant un angle α avec la normale au miroir, il faut, pour qu'ils soient réfléchis en direction horizontale, que cet angle α soit exactement la moitié de l'angle formé par les rayons lumineux avec l'horizontale.

On calcule donc à l'avance cet angle α en mesurant la hauteur h du foyer lumineux au-dessus de l'axe du miroir et sa distance d au miroir en projection horizontale. On a $tg\,2\alpha = \frac{h}{d}$; il suffit alors de placer le miroir sur la division α du cercle divisé pour que les rayons du foyer soient réfléchis en direction horizontale.

Pour faire varier l'angle α, c'est-à-dire l'inclinaison sous laquelle on mesure l'intensité lumineuse, il suffit de suspendre le foyer à étudier à une corde et de l'élever ou de l'abaisser à volonté, ou encore d'éloigner plus ou moins le miroir du pied de la verticale du foyer.

Ce dispositif suffit si le foyer peut être placé verticalement au-dessus de l'axe du photomètre. Mais ce n'est pas toujours le cas. Il faut alors que le miroir soit aussi mobile autour d'un axe vertical. L'angle de rotation autour de l'axe vertical correspond à l'azimut A, tandis que l'angle de rotation autour de l'axe horizontal correspond à la hauteur h. On a alors, à l'aide des formules de la trigonométrie sphérique, comme condition pour que le rayon lumineux réfléchi soit horizontal :

$$\cos 2\alpha = \cos A \cos h.$$

On peut aussi recommander la disposition suivante. On fixe un axe horizontal R parallèle à l'axe du photomètre et au-dessus de celui-ci. On fixe ensuite à cet axe un bras mobile à l'extrémité duquel on suspend la lampe à arc par exemple. Le point d'attache de ce bras est placé verticalement au-dessus du miroir. En tournant ce bras, le foyer lumineux décrit un quart de circonférence dont le miroir occupe le centre. Le miroir restant fixe, sa distance au foyer est invariable.

MM. Sautter et Lemonnier ont aussi employé avantageusement la disposition suivante. La lampe à arc est placée sur un support mobile sur un axe vertical, vis-à-vis d'une règle divisée sur laquelle un index indique exactement la hauteur de l'axe.

Le miroir est fixé sur la tige qui porte la division, et mobile autour d'un axe horizontal. Il porte un index qui permet de déterminer par une simple lecture sur la tige divisée et un calcul facile l'inclinaison du miroir.

Tous les appareils précédents comportent l'emploi d'un ou de plusieurs miroirs. Avant de les utiliser, il faut déterminer l'affaiblissement de la lumière produite par l'absorption du miroir, c'est-à-dire déterminer quel est le coefficient de réflexion pour différentes incidences. Cette mesure se fait le plus simplement de la manière suivante.

On compare, au photomètre ordinaire, les intensités lumineuses de deux sources de lumière aussi constantes que possible, de deux lampes à pétrole ou de deux lampes à incandescence; on obtient ainsi le rapport $\frac{1}{a_1}$. On fait ensuite la même détermination à l'aide du miroir, et l'on

obtient un autre rapport $\frac{1}{a_2}$. Le coefficient de réflexion du miroir est alors $a = \frac{a_2}{a_1}$, et la perte par absorption est représentée par l'expression $(1 - a)$. Tous les résultats obtenus à l'aide du miroir doivent alors être multipliés par le facteur $\frac{1}{a}$.

Voici quelques valeurs obtenues par Sautter et Lemonnier à l'aide d'un miroir argenté et à l'exposition de Munich à l'aide d'un miroir du même genre :

	Sautter et Lemonnier.	Munich.
Angle d'incidence.	a	a
5°	0,68	»
10°	0,74	0,700
15°	0,81	0,690
20°	0,85	0,696
25°	0,85	0,700
30°	0,85	0,695
40°	»	0,696

Des mesures récentes d'Uppenborn confirment ces résultats et montrent en particulier que l'absorption dépend d'une manière sensible de l'angle d'incidence; il faut donc déterminer le coefficient d'affaiblissement d'un miroir pour les diverses valeurs de l'incidence sous lesquelles on l'emploie.

Supports pour la photométrie des lampes à incandescence.

119. Il est aussi indispensable de mesurer l'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence dans plusieurs directions; cependant on se borne, le plus souvent, à faire ces mesures dans le même plan horizontal pour divers azimuts, les variations de l'intensité horizontale étant surtout ce qu'on désire connaître exactement.

On a imaginé plusieurs appareils pour faciliter ces mesures. Voici par exemple la description de celui que le Comité des essais électriques de l'exposition d'Anvers a employé avec succès.

Il se compose (fig. 67) d'une planchette que l'on fixe verticalement à l'une des extrémités du banc photométrique, et parallèlement à son axe. Contre cette planchette est appuyé un cercle, portant de 22°,5 en 22°,5 des entailles dans lesquelles peut s'engager une saillie d'une lame flexible tangente à la circonférence du cercle; ce cercle est mobile autour d'un axe horizontal passant par son centre et supporté par la planchette.

Au centre de ce cercle est fixé un tube formé de trois branches D, E, F, la première et la dernière étant parallèles au plan du cercle, la seconde perpendiculaire; le support de la lampe est ajusté dans un tube G qui peut s'emboiter dans le tube. On peut amener et fixer, à l'aide d'une vis de

pression, la lampe, de manière à ce qu'elle soit exactement en regard du centre du cercle gradué; on peut, en outre, faire tourner le tube G, et par suite la lampe autour de l'axe du filament. Le tube mobile porte un index fixé perpendiculairement à cet axe et servant à mesurer l'angle de rotation sur un cercle divisé; celui-ci est en outre muni d'un arrêt qui permet de fixer la lampe pendant la durée des mesures, dans un azimut quelconque.

M. Heim a imaginé également un petit support qui a été modifié légère-

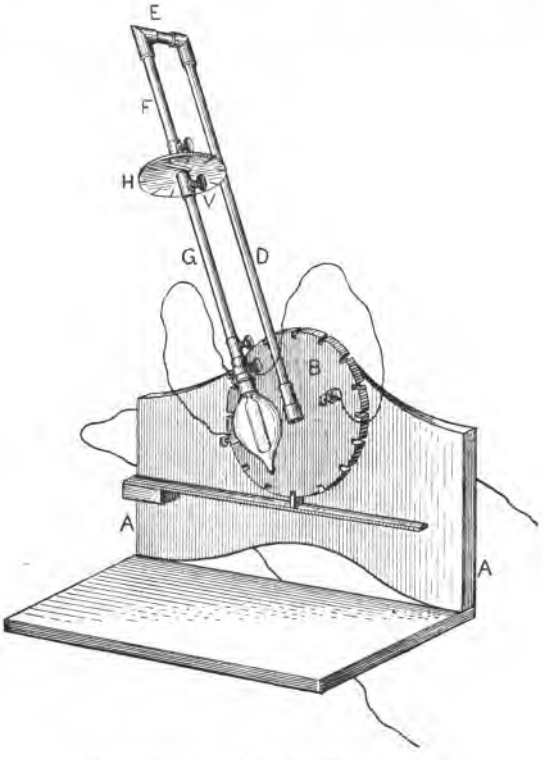


Fig. 67. — Support de M. Rousseau.

ment par M. Krüss de manière à éviter que le support se place jamais sur le trajet des rayons lumineux. La figure 68 donne une vue de cet appareil qui se place verticalement sur le banc photométrique en enfonçant le bloc A dans la rainure du banc. L'index Z sert à indiquer la position de l'appareil.

Le support B peut être déplacé verticalement mais n'est pas mobile autour d'un axe vertical. Ce bras porte en *c* l'axe horizontal autour duquel la lampe peut être tournée d'un angle qui se lit sur le centre K à l'aide de l'index J. A l'axe *c* est fixé un bras D sur lequel s'appuie la

douille E à laquelle la lampe est fixée. Cette douille peut être tournée à volonté et l'angle se lit sur le tambour E qui tourne vis-à-vis du repère fixe *i*.

Quelle que soit la position que l'on donne à la lampe, le point *m* reste

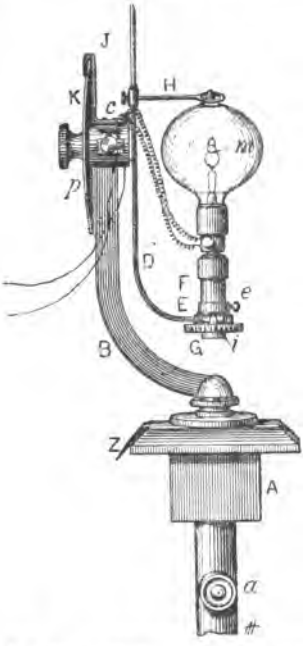


Fig. 68. — Support Heim-Krüss.

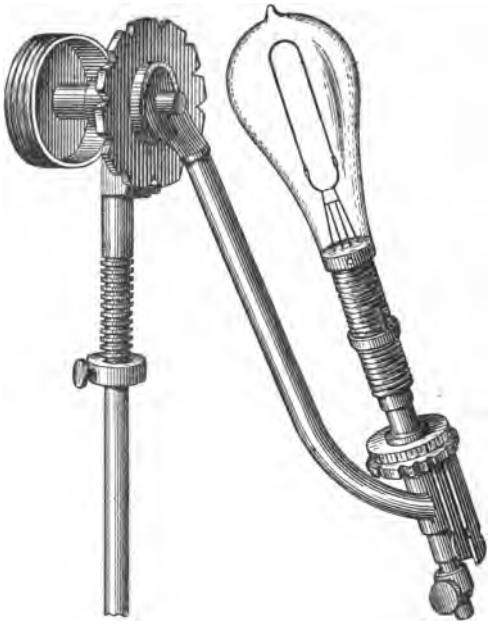


Fig. 69. — Support de l'Institut Franklin.

toujours fixe, c'est-à-dire à la même hauteur, et à la même distance de l'écran.

Lors des essais de durée des lampes à incandescence, la Commission de l'Institut Franklin a employé un support représenté par la figure 69 et qui se rapproche dans ses grandes lignes de celui de M. Rousseau. Les entailles sont fixes et disposées de manière à faire les mesures de 22°,5 en 22°,5.

CHAPITRE V

LES FOYERS ÉLECTRIQUES

A. — Lampes a incandescence.

Principe des lampes à incandescence.

120. Lorsqu'un conducteur dont la résistance électrique est R est traversé par un courant d'intensité I, la quantité de chaleur développée dans ce conducteur pendant le temps t est égale, d'après la loi de Joule, à :

$$\frac{RI^2t}{g.E},$$

g étant l'accélération de la pesanteur, E l'équivalent mécanique de la chaleur.

Lorsque les constantes R et I sont suffisamment grandes, la quantité de chaleur développée peut être assez considérable pour porter le conducteur à l'incandescence ; il n'est pas difficile de poser les équations différentielles du problème, dans les cas les plus simples, en tenant compte de la déperdition de chaleur. Mais cette étude mathématique n'est d'aucune utilité au point de vue photométrique.

La lampe à incandescence comprend donc un conducteur constitué par un filament de charbon qui offre une grande résistance au courant; il est disposé de manière à pouvoir subir l'action d'une haute température sans se désagréger. L'intensité lumineuse du filament dépend de sa température, de sa surface, et de son pouvoir émissif; en augmentant ce dernier on augmente le rendement de la lampe, c'est-à-dire la quantité de lumière qui correspond à une dépense d'énergie déterminée. C'est cette augmentation du pouvoir émissif qui a surtout été réalisée dans les perfectionnements que la lampe à incandescence a subis pendant ces dix dernières années.

On augmente le pouvoir émissif du filament en recouvrant ce dernier d'un dépôt brillant de carbone, car on a trouvé que les filaments dont la surface est d'un noir terne ont un rendement plus faible que ceux dont la surface est brillante; on obtient les filaments à surface brillante en les maintenant à une température élevée dans la vapeur d'un hydrocarbure

à point d'ébullition élevé. Ce procédé de carburation supplémentaire des filaments est adopté aujourd'hui par la plupart des fabricants.

Fabrication des lampes à incandescence.

121. Les lampes à incandescence dans le vide sont les seules qui sont devenues d'un usage courant; il n'y a pas lieu de s'occuper des systèmes basés sur l'incandescence du charbon ou du platine à l'air libre, ces systèmes n'étant jamais sortis de la période d'essais.

Déjà, en 1841, M. de Moleyns fit breveter en Angleterre un appareil pour la production de la lumière par l'incandescence d'un fil de platine dans un globe de verre fermé, et en 1845 King prit également des brevets relatifs à une lampe à charbon incandescent imaginée par Starr, de Cincinnati. Il faut mentionner ensuite les travaux de de Changy (1858), de Lodyguine (1873) et de Konn, de Swan, etc. Mais c'est Edison qui a construit industriellement la première lampe à incandescence réellement satisfaisante (1880) et réellement marchande.

L'éclairage électrique par incandescencence a donc douze ans d'existence seulement; néanmoins les lampes à incandescence sont déjà arrivées à un degré satisfaisant de perfection grâce aux nombreuses études systématiques dont elles ont été l'objet. En particulier l'étude photométrique des lampes à incandescence a été poussée très loin, ce qui a permis d'ailleurs aux constructeurs de modifier avantageusement leurs procédés de fabrication.

Toute lampe à incandescence se compose d'un filament de charbon fixé à deux fils en platine, d'une ampoule en verre dans laquelle on a fait le vide qui traverse l'ampoule, et enfin d'un manchon fileté faisant corps avec l'ampoule et destiné à retenir la lampe sur son support.

Voici d'une manière générale comment s'effectue actuellement la fabrication des lampes à incandescence.

Les ampoules sont soufflées à la verrerie d'où les fabricants les tirent directement; la première manipulation consiste à les préparer pour y adapter le filament.

La nature du filament varie suivant les systèmes; on en emploie principalement de trois sortes. Quelques fabricants prennent des fils de coton (Swan), d'autres de la gélatine ou de la cellulose vitrifiée (Khotinski, Lane-Fox); d'autres encore prennent des fibres végétales (Edison, Siemens); enfin quelques uns emploient une fibre naturelle soumise à un procédé chimique (Langhans, Cruto, Seel). Suivant la nature du filament, on lui donne sa forme définitive soit à la filière, soit entre des cylindres, soit enfin en le découpant dans la masse plastique.

La fibre ainsi obtenue est transformée en charbon compact par une exposition prolongée à une température élevée produite dans un creuset

ou par le courant électrique lui-même. Pour donner au filament l'homogénéité nécessaire et la résistance voulue, il faut déposer sur sa surface une couche de charbon; ce dépôt s'effectue de bien des manières différentes qui sont propres à chaque fabricant. Une méthode bien simple consiste, par exemple, à plonger le filament dans du pétrole et à le porter au rouge au sein du liquide.

Le filament étant coupé à la longueur voulue, Edison fait pincer le charbon par le fil de platine et recouvre les points d'attache d'une couche de cuivre électrolytique; Lane-Fox et Swan y déposent une plus grande quantité de charbon, tandis que d'autres fabricants emploient un ciment spécial; la soudure au charbon tend actuellement à être de plus en plus employée.

On peut fixer les filaments à l'ampoule de deux manières. On fond les deux fils dans un fragment de verre qu'on soude ensuite au col de l'ampoule ou bien on fixe les fils séparément sur les bords d'une douille de verre qu'on soude ensuite à l'ampoule; on souffle également un long tube mince afin de permettre la production du vide. Le raréfaction des lampes a lieu à l'aide de pompes à mercure; les pompes Sprengel à jet de mercure tombant sont presque exclusivement employées.

Le vide effectué, on constate le bon état de la lampe, puis on vérifie l'intensité lumineuse et la résistance à froid. L'ampoule n'est fixée à sa monture qu'au moment de l'expédition.

Les dimensions des filaments varient naturellement avec l'intensité lumineuse de la lampe; elles doivent être d'autant plus considérables que l'intensité lumineuse normale de la lampe est plus élevée. Ces dimensions dépendent aussi de la résistance propre de la substance carbonisée. Quant à la forme de la section du filament, la forme circulaire est préférable parce qu'elle présente une résistance plus grande à égalité de surface extérieure.

Dans les lampes Edison, les filaments ont une section de $0^{mm},3$ sur $0^{mm},1$ et une longueur développée de 125 millimètres pour les lampes de 16 bougies et de 110 millimètres pour celles de 10 bougies. Dans les lampes Maxim de 16 bougies, la section est de $0^{mm},5$ sur 1 millimètre et la longueur développée est de 113 millimètres. Les filaments des lampes Siemens ont une section circulaire dont le diamètre est de de $0^{mm},15$ à $0^{mm},20$ et $0^{mm},27$ pour les lampes de 10, 16 et 25 bougies. La longueur du filament pour les mêmes lampes est de 110, 125 et 145 millimètres.

Intensité lumineuse des lampes à incandescence.

122. On ne peut pas établir d'une manière générale pour toutes les lampes à incandescence la loi suivant laquelle l'intensité lumineuse varie avec la direction du rayon, car cette loi dépend surtout de la forme du

filament qui peut varier beaucoup d'une lampe à l'autre. En effet, le filament des lampes Edison a la forme d'un U renversé, celui des lampes Swan d'une boucle horizontale; dans les lampes Maxim, le filament est en forme de M, tandis que dans les lampes Weston il est enroulé en spirale autour d'un arc en forme de fer à cheval; le filament des lampes Gérard a la forme d'un angle aigu s'appuyant sur la base de l'ampoule; celui des lampes Bernstein de grande intensité a aussi cette forme, bien que quelques autres types du même système aient un filament en forme de Δ renversé.

L'étude de la répartition de l'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence est très complexe. La forme du filament produit une asymétrie sensible dans la répartition de l'intensité lumineuse qui ne varie pas seulement avec l'inclinaison du rayon lumineux mais aussi avec son azimut.

Intensité horizontale.

123. La lampe étant supposée verticale, c'est le plus souvent l'intensité horizontale qu'il s'agit de connaître. Les variations de l'intensité lumineuse horizontale dépendent essentiellement de la forme du filament.

L'intensité horizontale est surtout caractérisée par la valeur de l'intensité horizontale moyenne. On sait que la détermination de cet élément nécessite la mesure de l'intensité lumineuse horizontale sous un grand nombre d'angles différents, à intervalles égaux. L'intensité horizontale moyenne est alors la moyenne des valeurs ainsi obtenues. Dans la pratique, il est bon de faire les mesures à des intervalles de 22°,5 et de calculer alors la moyenne des 16 résultats. On peut souvent aussi se borner à prendre des intervalles de 30 ou de 45 degrés.

124. On peut même simplifier considérablement ce calcul en tenant compte du fait suivant constaté sur la plupart des lampes à incandescence. Pour toutes les lampes d'un système donné, on peut obtenir la valeur de l'intensité moyenne horizontale en multipliant l'intensité horizontale mesurée dans le plan du filament par un *facteur de réduction* C_0 qui est le même pour toutes les lampes du même système; ce facteur C_0 oscille entre 0,8 et 0,9. On arrive au même résultat en multipliant l'intensité horizontale mesurée perpendiculairement au plan du filament par un facteur C_1. Enfin, à l'exposition d'électricité de Paris en 1881, on a calculé le même élément en multipliant par un facteur C_2 l'intensité horizontale mesurée dans un plan à 45° sur celui du filament.

On peut calculer, en partant des lois photométriques fondamentales, les valeurs de ces coefficients C_0, C_1 et C_2 en supposant la forme et les dimensions du filament parfaitement connues.

Ces valeurs s'obtiennent aisément comme cas particulier du problème plus général dans lequel on détermine théoriquement les variations de

l'intensité avec la direction des rayons. Pour préciser, considérons le cas d'une lampe Edison.

La quantité de lumière provenant de l'élément ds, et tombant sur l'élément ds', est égale à

$$q = i\frac{ds\,ds'\cos\theta\cos\theta'}{r^2},$$

r éantt la distance des deux éléments, θ et θ' l'angle de leur normale avec r et i l'intensité lumineuse de l'élément ds.

Le filament de la lampe Edison a la forme d'un U renversé. Désignons par l la longueur des branches verticales, par h celle de la branche transversale horizontale, et supposons que le filament ait une section de forme rectangulaire ; désignons par a la longueur de cette section dans le sens du plan du filament et par b la largeur dans le sens perpendiculaire.

Supposons que l'élément ds' appartienne à une sphère concentrique à la lampe et de rayon r suffisamment grand ; on peut alors admettre $\theta' = 0$, et $\cos\theta' = 1$.

La quantité de lumière émise horizontalement dans une direction faisant l'angle β avec le plan du filament et reçue par l'élément ds' d'une zone équatoriale très étroite de la sphère concentrique r, est égale à

$$q_{h\beta} = \frac{ds'}{r^2}\cdot[2l(a\sin\beta + b\cos\beta) + ah\sin\beta].$$

La quantité totale de lumière émise dans le plan horizontal, c'est-à-dire reçue par la zone de hauteur très petite δ, pour laquelle $ds' = \delta.\,rd\beta$, est donc :

$$Q_h = \frac{4\,i\delta r}{r^2}\int_0^{\frac{\pi}{2}}[2l(a\sin\beta + b\cos\beta) + ah\sin\beta]\,d\beta$$

ou en intégrant :

$$Q_h = \frac{4\,i\delta r}{r^2}[2l(a+b) + ah].$$

L'intensité horizontale moyenne sera donc :

$$I_{hm}' = \frac{Q_h}{2\pi r.\delta} = \frac{2i}{r^2}\cdot\left[\frac{2l(a+h) + ah}{\pi}\right]. \qquad (1)$$

Quant à l'intensité horizontale sous l'angle β, elle est égale à $q_{h\beta}$ divisé par ds', c'est-à-dire à

$$I_{h\beta} = \frac{i}{r^2}[2l(a\sin\beta + b\cos\beta) + ah\sin\beta]. \qquad (2)$$

Dans le plan du filament, l'intensité devient ($\beta = \theta$) :

$$I_{0^0} = \frac{2lbi}{r^2}. \qquad (3)$$

Dans le plan perpendiculaire au plan du filament, on a :

$$I_{90^0} = \frac{a(2l+h)i}{r^2}. \qquad (4)$$

Enfin, dans la direction à 45° sur le plan du filament, l'intensité est égale à

$$I_{45°} = \frac{i}{r^2} \cdot \left[\frac{2l(a+b)+ah}{\sqrt{2}}\right]. \qquad (5)$$

Les valeurs 1, 3 et 4 montrent que les rapports entre l'intensité horizontale moyenne et les intensités à 0° et à 90° sont constants pour le même type de lampe, mais qu'ils dépendent des dimensions du filament. La relation $I_{hm} = C_0 I$ ou $I_{hm} = C_1 I_{90°}$. est donc exacte.

Mais le rapport entre l'intensité moyenne et l'intensité à 45° est encore plus simple, car on trouve qu'il est indépendent des dimensions du filament; on a en effet :

$$\frac{I_{hm}}{I_{h45°}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0{,}9003 = C_2.$$

Ce résultat a été confirmé par les mesures directes de M. Hagenbach et par celles des expositions de Munich, de Vienne, etc.; cependant la valeur de la constante déterminée expérimentalement est un peu plus élevée que 0,9003. Cela tient à ce que la section du filament n'est pas un rectangle parfait comme nous l'avons supposé; le facteur tend d'autant plus vers l'unité que la section se rapproche davantage de la forme circulaire.

A l'aide de 8 lampes Edison, M. Hagenbach a obtenu C = 0,95; à Vienne on a obtenu 0,94 pour des lampes Maxim et 0,98 pour des lampes Edison.

Dans toutes les lampes dont le filament a une forme analogue à celle du filament de la lampe Edison on peut donc déterminer l'intensité moyenne horizontale par une seule mesure de l'intensité horizontale dans une direction à 45° sur le plan du filament. On a alors une approximation satisfaisante :

$$I_{hm} = 0{,}95 \; {}_{45°}. \qquad (6)$$

M. Hagenbach a donné aussi la formule suivante pour calculer l'intensité moyenne horizontale :

$$I_{hm} = \frac{I_{0°} + 2I_{45°} + I_{90°}}{4}.$$

Cette formule concorde en général très bien avec la réalité. Voici, par exemple, les valeurs obtenues à Vienne sur deux lampes Maxim et Edison dont les différences dans la répartition de l'intensité horizontale sont très considérables (1).

(1) *Expériences faites à l'Exposition d'électricité de Paris*, p. 44.

LAMPE.	I_0	$I_{45°}$	$I_{90°}$	I_{hm}	
				CALCULÉE.	OBSERVÉE.
Maxim	0.999	0.793	0.219	0.701	0.716
Maxim	1.021	0.766	0.282	0.709	0.743
Edison	1.020	1.029	1.083	1.040	1.046
Edison	1.018	1.234	1.224	1.178	1.175

Les mesures de Munich, de Philadelphie et d'Anvers ont également démontré l'exactitude de cette formule, au moins dans la limite de précision des observations.

125. On peut aussi obtenir directement la valeur de l'intensité horizontale moyenne à l'aide du procédé ingénieux imaginé par M. Crova (1), et qui simplifie beaucoup les mesures et les calculs. On monte la lampe sur un mouvement d'horlogerie qui la fait tourner autour de son axe géométrique avec une vitesse de 4 à 5 tours par seconde; le courant arrive à la lampe par deux bagues isolées sur lesquelles appuient deux balais.

La lampe apparaît comme un fuseau lumineux très fixe dont l'intensité est exactement la moyenne horizontale. Il serait préférable de monter la lampe sur un petit moteur électrique à fil très fin, mis en dérivation sur ses deux bornes. Le courant qui l'illumine la mettrait aussi en rotation.

Intensité moyenne sphérique.

126. La connaissance de la forme et des dimensions du filament permet de calculer la répartition de l'intensité lumineuse avec la direction du rayon ; mais ce calcul, assez compliqué, n'offre pas d'intérêt pratique.

La détermination exacte de la surface photométrique d'une lampe à incandescence exige donc des mesures précises ; on peut les abréger considérablement grâce aux considérations suivantes. La projection du filament sur un plan vertical variant d'une manière uniforme lorsqu'il tourne autour de son axe vertical, il en résulte que la répartition de l'intensité lumineuse est la même dans tous les parallèles horizontaux de la sphère unité concentrique, c'est-à-dire que les sections horizontales de la surface photométrique sont des courbes semblables entre elles et avec celle de l'intensité horizontale. C'est pourquoi on se borne généralement à déterminer les variations de l'intensité lumineuse avec l'inclinaison, dans un plan vertical seulement ; les variations dans un autre plan vertical suivent la même loi.

On sait que l'intensité horizontale est égale à C_0I_0, I_0 étant l'intensité

(1) *Comptes rendus des travaux du congrès des électriciens de* 1889, p. 208.

horizontale dans le plan du filament, et C_0 le facteur de réduction correspondant ; ce facteur est le même pour tous les parallèles de la sphère unité. Or, si I_{hm} désigne l'intensité moyenne du parallèle correspondant à l'inclinaison θ, la quantité totale de lumière reçue par la sphère unité est

$$Q = 2\pi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} I_{hm} \cos\theta \, d\theta = 4\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{hm} \cos\theta d\theta.$$

L'intensité moyenne sphérique est égale à Q divisé par 4π, c'est-à-dire

$$I_{sm} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{hm} \cos\theta d\theta.$$

Or l'intensité I_{hm} est une fonction de l'inclinaison de la forme

$$I_{hm} = I_0 . f(\theta)$$

par conséquent

$$I_{sm} = I_0 . \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta) \cos\theta d\theta.$$

Si l'on pose

$$C = \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta) \cos\theta d\theta$$

on obtient

$$I_{sm} = C . I_0.$$

La constante C qui s'appelle le facteur de réduction de l'intensité horizontale à l'intensité moyenne sphérique ne varie pas sensiblement d'une lampe à l'autre : pour la déterminer, il faut avoir recours à des mesures sur des lampes de divers systèmes.

On peut enfin calculer les valeurs de l'intensité moyenne sphérique en multipliant l'*intensité horizontale moyenne* par un facteur de réduction C', qu'on peut appeler le facteur de réduction de l'intensité horizontale moyenne à l'intensité moyenne sphérique.

Nous donnons ci-dessous les valeurs des constantes C_0 et C, calculées à l'aide des mesures faites à l'exposition d'électricité de Vienne en 1883.

LAMPE.	C_0	C
Lodyguine	0.998	0.776
Muller	0.989	0.863
Rawson	0.981	0.758
Maxim	0.735	0.556
Siemens	1.007	0.748
Bernstein	0.973	0.718
Swan	1.150	0.946
Edison	1.175	0.957
Muller	1.011	0.875
Lane-Fox	1.006	0.734

Résultats du comité d'essais de l'Institut Franklin.

127. Les lampes à incandescence ont été l'objet de nombreuses mesures

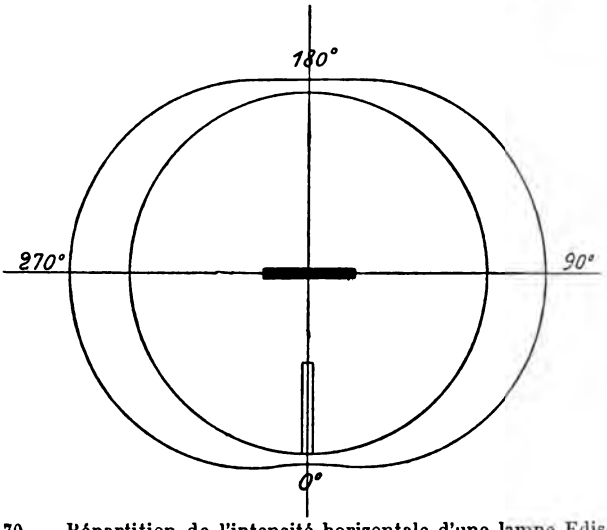


Fig. 70. — Répartition de l'intensité horizontale d'une lampe Edison.

photométriques dans le but de déterminer la répartition de l'intensité

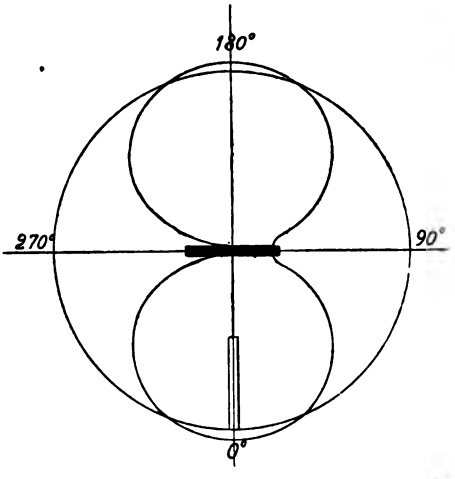


Fig. 71. — Variations de l'intensité lumineuse d'une lampe Edison dans un plan de 0 degré d'azimut.

avec la direction du rayon lumineux. Déjà, en 1881, à l'exposition d'électricité, cette question a été étudiée très soigneusement. Les mesures des

comités des expositions de Munich, de Vienne et d'Anvers ont donné aussi des documents très intéressants et très utiles à consulter. Mais au point de vue de l'importance des essais, ce sont les mesures du comité de l'Institut Franklin qui l'emportent. De nombreuses lampes de chaque type ont été étudiées, en sorte que les éléments obtenus pour chacun d'eux ont la signification de valeurs moyennes, et partant une importance plus grande.

Nous avons résumé dans les tableaux I à IV les principaux éléments photométriques des lampes étudiées.

Le tableau I renferme les constantes principales de chaque type, obtenues en prenant les moyennes d'un nombre considérable de lampes (10 ou 20).

TABLEAU I

DÉSIGNATION ET NOMBRE DES LAMPES.	DIFF. de pot. aux bornes. Volts.	INTENSITÉ du courant. Ampères.	INTENSITÉ sphérique moyenne. Bougies.	WATTS par bougie sphérique.	INTENSITÉ moyenne horizontale.
Edison (20)	97.0	0.709	15.49	4.48	18.83
Stanley (10)	96.4	0.551	13.56	3.92	16.54
Woodhouse et Rawson (10)	55.48	1.026	15.09	3.56	19.11
White (10)	49.99	1.017	12.44	4.08	15 08
Weston (20)	111.4	0.530	16.27	3.63	17.87

Le tableau II renferme les valeurs de l'intensité horizontale pour différents azimuts ; dans ce tableau, comme dans le suivant, l'origine des azimuts coïncide avec le plan perpendiculaire à la base du filament.

TABLEAU II

AZIMUT.	EDISON.	STANLEY.	WOODHOUSE et RAWSON.	WHITE.	WESTON.
0°	16.61	16.65	14.71	14.80	19.96
30	18.20	16.60	18.23	14.63	14.99
60	20 45	16.43	20.98	14 97	12.37
90	20.88	16.36	20.42	15.17	16.67
120	20.82	16.35	20 02	15.10	21.51
150	18.86	16.68	18.51	15.13	22.11
180	16.87	17.03	14.48	14.87	19.79
210	18.48	16 85	18.71	14.96	14.58
240	20.74	16.40	21.27	15.00	11.98
270	21.10	16.20	22.46	15.18	16.51
300	20.93	16.43	20.63	15.21	21.74
330	12.12	16.45	18.95	15.08	22.24

Dans le troisième tableau on trouve les valeurs de l'intensité lumineuse sous différentes inclinaisons pour deux azimuts différant de 90°.

L'origine des inclinaisons est dans le plan horizontal et elles sont mesurées de 0° à 360° en passant par dessus la lampe.

TABLEAU III

INCLINAISON.	EDISON.		STANLEY.		WOODHOUSE ET RAWSON.		WESTON.	
	Azimut de 0°.	Azimut de 90°.	Azimut de 0°.	Azimut de 90°.	Azimut de 0°.	Azimut de 90°.	Azimut de 0°.	Azimut de 90°.
0°	16.70	20.64	16.54	16.23	14.76	20.56	19.82	16.17
30	15.02	18.31	15.29	14.90	13.48	20.00	19.31	15.40
60	9.54	11.93	11.04	11.86	9.60	13.32	16.39	13.74
90	3.57	3.08	6.80	7.00	6.74	5.77	13.39	13.00
120	8.25	11.54	10.35	11.74	10.71	13.17	16.24	13.41
150	14.96	18.21	14.99	14.87	14.06	18.72	19.13	15.63
180	16.82	20.87	16.85	16.81	14.71	21.81	19.76	16.42
210	14.84	17.85	15.00	14.54	14.34	19.62	18.82	15.76
240	9.07	11.11	9.57	9.11	11.28	14.11	16.34	15.08
270	»	»	»	»	»	»	»	»
300	9.84	11.68	9.26	10.40	9.75	13.52	17.34	13.83
330	15.06	17.69	14.83	14.33	13.64	18.10	18.78	14.64

Enfin le quatrième tableau renferme les constantes C_0, C_1, C, C et C′ que nous avons calculées à l'aide des résultats détaillés publiés par le comité de l'Institut Franklin.

TABLEAU IV

LAMPES.	C_0	C_1	C	C′
Edison	1.09	1.26	0.74	0.80
Stanley	1.00	0.98	0.83	0.83
Woodhouse et Rawson	0.88	1.03	0.74	0.83
White	0.99	1.02	0.82	0.83
Weston	1.08	0.90	0.98	0.91

Les courbes des figures 70 à 75 représentent les variations de l'intensité lumineuse dans un plan horizontal, dans un plan vertical d'azimut 0 et dans un plan vertical d'azimut 90°. Les trois premières figures sont relatives à la lampe Édison, les trois autres à la lampe Weston.

Nous avons choisi les diagrammes de ces deux lampes à cause des grandes divergences dans la forme de leur filament. Dans la première lampe, le filament a la forme d'un U renversé, tandis que dans la seconde le filament est tordu en hélice autour d'un axe qui affecte à peu près la forme d'un U renversé. Les diagrammes montrent bien l'influence de ces différences de forme surtout sur les variations de l'intensité dans leur plan vertical.

Nous avons déjà vu que la distribution horizontale dépend de la section

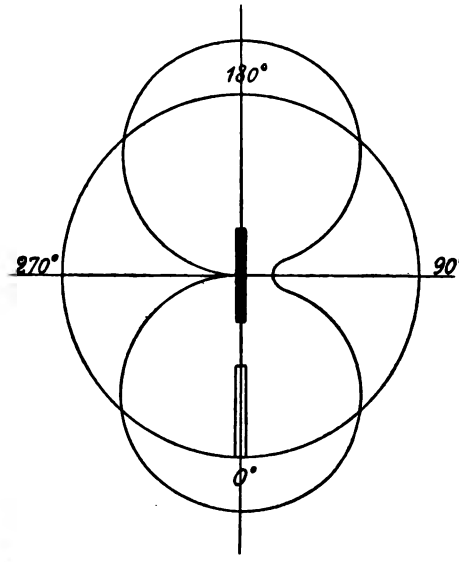


Fig. 72. — Variations de l'intensité lumineuse de la lampe Edison dans un plan vertical de 90 degrés d'azimut.

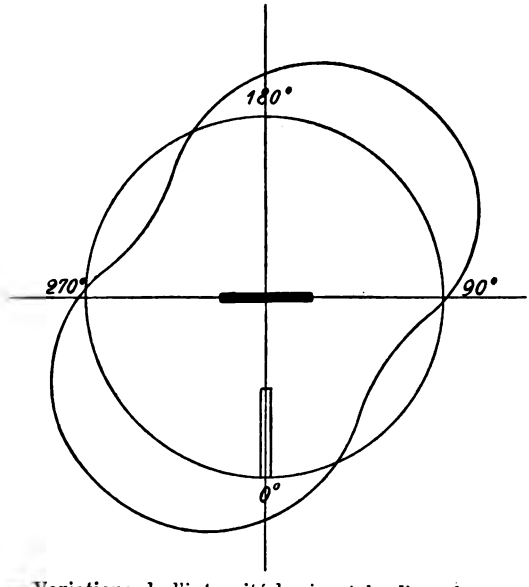


Fig. 73. — Variations de l'intensité horizontale d'une lampe Weston.

du filament. Si celle-ci est circulaire, comme dans les lampes White et

Stanley, la courbe de l'intensité horizontale forme pratiquement un cercle. Si elle est rectangulaire, comme dans la lampe Édison et Woodhouse et

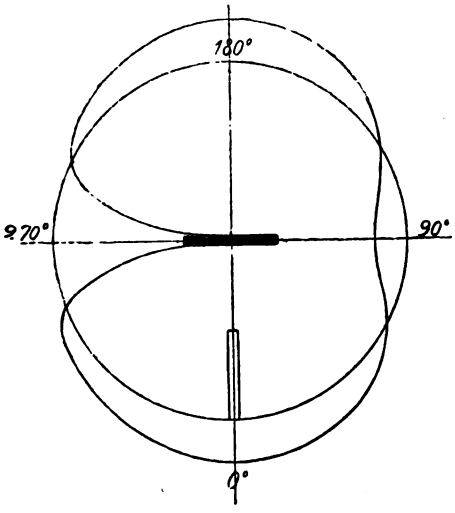


Fig. 74. — Variations de l'intensité lumineuse de la lampe Weston dans un plan vertical de 0 degré d'azimut.

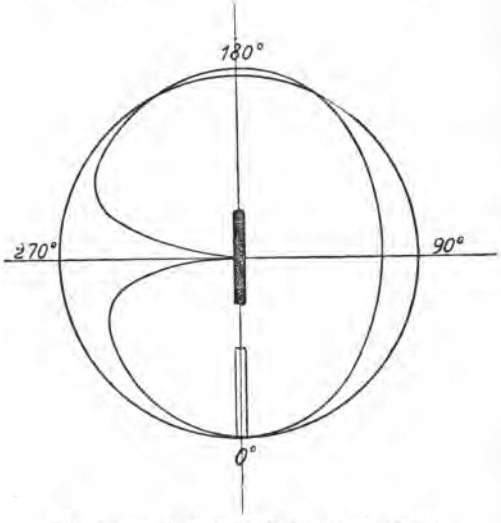


Fig. 75. — Variations de l'intensité lumineuse de la lampe Weston dans un plan de 90 degrés d'azimut.

Rawson, l'intensité horizontale maximum correspond au côté le plus long du rectangle.

Variations de l'intensité lumineuse avec l'énergie dépensée dans le filament.

128. L'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence varie avec la température du filament, c'est-à-dire avec le travail électrique dépensé dans celui-ci. Ces variations de l'intensité lumineuse jouent un rôle important dans les applications des lampes à incandescence à l'éclairage, car il existe pour chaque lampe une intensité lumineuse déterminée qui correspond à une durée donnée.

Jamieson (1) a fait le premier des recherches systématiques étendues sur la relation qui existe entre l'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence et le travail dépensé dans le filament. Il a obtenu pour les lampes usuelles des diagrammes très intéressants, en portant comme abscisse le travail dépensé et comme ordonnée l'intensité lumineuse.

Le Dr Higgs a essayé de représenter analytiquement cette relation en posant :

$$I = MW^2,$$

(1) *Lum. él.*, vol. VII, p. 137.

I étant l'intensité lumineuse exprimée en bougies, W le travail dépensé, et M une constante dépendant de la nature de la lampe.

Mansel, à Glascow, a donné aussi les formules suivantes :

$$\log B = \log E + ar$$
$$\log bB = \frac{1}{B} \log I + Ar$$

dans lesquelles E est la différence de potentiel aux bornes de la lampe, I l'intensité lumineuse, r la résistance de la lampe, a, b, B des constantes. Jamieson a simplifié ces formules en posant $a = 2$ A, et en supposant, ce qui est conforme à l'expérience, que $log\ b$B est constant, il les a mises sous la forme plus simple :

$$\log I = 6(\log E - \log A)$$

ou

$$I = \left(\frac{E}{A}\right)^6,$$

A étant une constante.

E. Voit, dans son remarquable rapport sur les mesures électriques de l'Exposition d'électricité de Munich, a essayé de déterminer une loi analytique simple donnant pour toutes les lampes à incandescence des résultats plus concordants que ceux fournis par les formules ci-dessus. Il a étudié les trois formules suivantes :

$$I = a_1 W^2$$
$$I = a_2 W^3$$
$$I = a_3 W^4$$

et il a trouvé que la dernière de ces formules représente les observations avec une assez grande exactitude, sauf pour les lampes Cruto.

En 1883, M. Goetz (1) de Zurich arriva à la conclusion que la formule

$$I = aW + bW^2$$

donnait des résultats plus concordants qu'aucune de celles qui avaient été proposées antérieurement. Cependant, en 1884, une étude de la lampe Bernstein, faite par M. Ganguillet (2), montra que la relation du troisième degré

$$I = \alpha W + \beta W^3$$

était encore plus exacte. Cette conclusion fut d'ailleurs vérifiée par de nombreuses mesures faites par M. Hess au laboratoire électro-technique de Zurich. Voici, par exemple, dans le tableau suivant, les résultats obtenus avec une lampe Swan de seize bougies. L'intensité du courant est représentée par i ; l'intensité lumineuse horizontale mesurée sous un angle de 45° par rapport au plan du filament est désignée par I, tandis

(1) *Lum. él.*, vol. XI, p. 207.
(2) *Lum. él.*, vol. XXIII, p. 520.

que I_1 représente l'intensité lumineuse calculée d'après la formule binome du troisième degré, et I_2 l'intensité calculée d'après la formule cubique de Voit. La moyenne ΔI_1 des écarts $I-I_1$ et ΔI_2 des écarts $I-I_2$ permet d'apprécier l'exactitude relative des deux formules.

E	i	W	I	I_1	I_2
33.90	0.90	30.68	1.27	1.00	1.59
40.92	1.10	45.05	4.25	4.51	5.02
44.26	1.18	52.49	7.43	7.67	7.94
45.65	1.22	55.70	9.28	9.26	9.49
48.04	1.29	61.91	13.28	13.26	13.03
49.25	1.32	65.02	13.56	15.54	15.09

$$I_1 = -0.0280W + 0.0000632W^3$$
$$I_2 = 0.0000549W^3$$
$$\Delta I_1 = 0.138$$
$$\Delta I_2 = 0.422$$

Voici les équations de quelques lampes déterminées d'après les observations de M. Hess, du comité d'expériences de Munich, etc. ; les coefficients sont relatifs à la bougie et au watt.

Lampe.	$I_2 = a_2W^3$ a_2	$I_1 = \alpha_1 W + \beta_1 W^3$ α_1	β_1
Swan n° 1	0.0000974	−0.02778	0.0001164
— n° 2	1020	−0.02434	1196
— n° 3	657	−0.00793	676
— n° 4	549	−0.0280	632
Maxim	247	+0.0472	215
Siemens	223	−0.0156	252
Müller	25	+0.0391	211
Cruto n° 1	320	+0.0796	196
— n° 2	528	+0.0274	4910
Edison	22	+0.3173	198

Ces conclusions ont été confirmées par les mesures ultérieures faites dans divers pays sur des lampes de systèmes et de fabrication différents. On peut donc admettre que l'intensité lumineuse d'une lampe électrique à incandescence est donnée par la somme de deux termes dont l'un est proportionnel au travail dépensé (en watts) dans la lampe et l'autre à la troisième puissance de ce travail. Cette formule s'applique aussi bien à l'intensité lumineuse de la lumière composée émise par la lampe, qu'à celle des principales radiations ; cela résulte des mesures photométriques de divers physiciens, de Schumann (1) entre autres.

Influence du degré du vide sur l'intensité lumineuse.

129. On possède quelques mesures exactes du degré du vide dans les lampes à incandescence usuelles. Il faut remarquer d'abord que le filament a une propriété absorbante considérable pour les gaz, propriété

(1) *Lum. él.*, vol. XIII, p. 60.

qui diminue à une température élevée; cela explique alors l'augmentation de la pression du gaz dans les lampes à chaud. Au point de vue pratique, c'est le degré du vide pendant l'incandescence qui offre de l'intérêt.

Des mesures de M. Heim (1) il résulte que la pression dans une lampe à incandescence à froid est inférieure à $0^{mm},01$ de mercure; à chaud cette pression augmente rapidement jusqu'à une certaine valeur qui ne dépasse pas $0^{mm},05$ et qui reste constante pendant un fonctionnement de plusieurs heures.

Il n'y a aucun avantage à pousser le vide trop loin, jusqu'au moment, par exemple, où apparaît autour du filament la légère auréole bleue signalée d'abord par Édison; on a remarqué, en effet, que les filaments des lampes évacuées jusqu'à ce point se désagrégent et ternissent plus rapidement l'ampoule. Les phénomènes d'évaporation électrique étudiés dernièrement par Crookes entrent alors en jeu.

Au point de vue théorique, un degré de vide aussi parfait que possible réduit à un minimum la perte d'énergie produite par la transmission de la chaleur effectuée par conduction directe des particules gazeuses, perte qui s'ajoute à celle du rayonnement. Or, on sait que l'intensité lumineuse varie beaucoup plus rapidement que la température ; aussi, avec un vide imparfait, faut-il, pour obtenir une intensité lumineuse déterminée, dépenser plus de travail qu'avec un vide meilleur.

Les recherches de M. Hess (2) sur l'influence du degré de vide dans la lampe Swan ont prouvé l'exactitude de ces conclusions; il en résulte que la tension du gaz d'une lampe à incandescence ne doit pas dépasser $0^{mm},2$ de mercure pour obtenir un rendement favorable; M. Hess a représenté par une formule l'intensité lumineuse d'une lampe pour un travail déterminé et pour une tension donnée; en appelant I_1 l'intensité lumineuse en bougies correspondant au vide absolu, I_2 l'intensité lumineuse pour une tension considérable, a un coefficient, l'intensité I à la tension p exprimée en millimètres est donnée par la formule

$$I = \frac{p^2 I_2 - a I_1}{p^2 - a}.$$

Pour un travail de 70 watts, et pour une lampe Swan, M. Hess a trouvé :

$$I = \frac{4,93 p^2 + 16,20}{p^2 + 0,96}.$$

Il en résulte que $I = 16,87$ bougies, si $p = 0$ et $I = 4,95$ si $p = 20$ millimètres.

Les résultats de M. Hess ont été confirmés par ceux de M. Higgins; ce dernier a étudié trois lampes dont l'une était remplie d'air à la

(1) *Lum. él.*, vol. XXIII, p. 415.
(2) *Lum. él.*, vol. XXIII, p. 523.

pression normale (76 centimètres de mercure), l'autre à demi évacuée d'air (25 centimètres de mercure), et la troisième dans les conditions de vide des lampes usuelles. Le rendement de ces trois lampes, c'est-à-dire le nombre de watts absorbés par bougie, a été trouvé de 7; 5,3 et 3,5 watts. On a pu constater aussi que la transmission de chaleur à l'air ambiant était dans le rapport de 32 à 25 et à 3,5.

Variations de l'intensité lumineuse avec la durée et avec le régime.

130. A la suite d'un fonctionnement un peu prolongé, le filament subit des changements assez considérables qui influent sur l'émission lumineuse de la lampe. On peut résumer ces changements comme suit.

Pendant une première période assez courte, la résistance du filament diminue rapidement, ce qui a pour effet d'augmenter l'éclat. Ces conditions restent à peu près stationnaires pendant une seconde période un peu plus longue que la première, puis elles se modifient ; la résistance augmente en même temps que l'intensité lumineuse décroît progressivement. Ce phénomène est produit par les modifications du filament qui devient peu à peu rugueux, tandis que sa section diminue ; il faut donc davantage de courant pour obtenir l'intensité lumineuse normale, tandis que l'augmentation de résistance diminue graduellement l'intensité. Il faut mentionner encore l'affaiblissement de l'intensité lumineuse produit par le dépôt charbonneux qui se forme sur l'ampoule et dont l'épaisseur augmente avec la durée de la lampe.

Les mesures les plus complètes sur les variations des éléments photométriques d'une lampe à incandescence ont été faites à Philadelphie en 1885, par les soins de l'Institut Franklin (1).

Voici par exemple les résultats des mesures effectuées sur 20 lampes Edison de 16 bougies, de 100 en 100 heures, pour un allumage total de 1000 heures. Le filament de la lampe n° 16 s'est rompu après 300 heures de marche, tandis que tous les autres ont survécu. Des résultats analogues ont été fournis par des lampes d'autres constructeurs.

(1) *Lum. él.*, 1885, vol. XVIII.

	INTENSITÉS EN BOUGIES (moyenne sphérique).							WATTS PAR BOUGIE.	
	NOMBRE D'HEURES.								
	Au début.	100.	200.	400.	600.	800.	1000.	Au début.	A la fin.
	14.57	12.70	12.10	9.20	10.60	9.80	9.20	4.82	6.97
	15.44	14.00	12.50	9.40	11.40	10.80	9.90	4.52	6.65
	16.81	15.40	14.40	10.20	11.30	11.70	9.90	4.24	6.56
	16 09	13.60	12.40	9.20	10.70	10.30	9.10	4.24	6.92
	15.11	14.30	12.10	9.70	11.70	11.00	9.60	4.55	6 55
	14.87	11.00	11.10	9.60	10.60	10.30	9.60	4.58	6.53
	15 60	11.50	11.70	10.00	9.60	9.50	7.10	4.43	7.13
	15.72	14.10	14.50	9.40	10.90	10.80	9.50	4.37	6.52
	16.41	15 10	14.30	9.60	10.90	9.50	10.30	4.27	6.24
	15.62	14.30	12.30	9.50	11.30	10.20	9.10	4.37	6.92
	14.58	13.20	12.10	9.40	11.60	11.00	9.50	4.79	6.55
	16.66	15.20	13.20	9.60	11.20	10.50	9.50	4.21	6.71
	16.02	12.30	10.90	9.10	10.10	10.20	9 60	4.44	6.82
	14.38	12.60	11.60	9.50	10.40	10.30	9.60	4.83	6.57
	13.76	13.70	12.30	9.00	11.30	10.70	10.00	4.92	6.33
	15.65	13 50	12.20	»	»	»	»	4.40	»
	15.82	12.60	11.10	8.40	9.70	9.50	8.90	4.43	7.14
	16.61	14.10	13.90	9.30	10.00	9.80	8.70	4.17	7.15
	15.31	13.50	11.90	9.60	10.30	10.10	9.10	4.45	6.81
	14.67	14.40	14.00	10.10	11.60	10.60	10.10	4.71	6.27
Moyennes...	15.43	13.55	12.58	9.50	10.87	10.34	9.38	4.48	6.66

La diminution de l'intensité lumineuse est très sensible; elle atteint souvent 30 p. 100. On constate quelquefois des diminutions plus considérables. Cette diminution est aussi intimement liée au régime de la lampe.

Au début des lampes à incandescence, on admettait un équivalent mécanique moyen de 5 watts par bougie, tandis que cet équivalent est actuellement au début de l'allumage de 3 watts en moyenne. Mais cette augmentation de rendement a été obtenue aux dépens de la durée de la lampe, qui est d'autant plus faible que le rendement est plus élevé. Puisque l'intensité lumineuse varie approximativement comme le cube de l'énergie dépensée dans le filament, il est facile de faire rendre 32 bougies à une lampe de 16, avec une dépense d'environ 2 watts par bougie, mais la lampe durera très peu de temps.

A mesure que l'intensité lumineuse diminue par suite d'un allumage prolongé de la lampe, la résistance du filament augmente et le rendement augmente rapidement. Les courbes A, B, C de la figure 76 représentent les variations de l'intensité lumineuse (A), de l'équivalent mécanique en watts par bougie (B) et de la résistance en ohms (C) en fonction du temps, ces éléments étant mesurés toutes les 100 heures. Ces résultats ont été obtenus à l'aide d'une lampe de 16 bougies nominales et le potentiel a été maintenu rigoureusement constant aux bornes de la lampe. Ils sont donc conformes à ceux qu'on obtient en pratique.

La diminution du rendement de la lampe à incandescence avec l'augmentation de la durée d'allumage s'explique facilement à l'aide des propriétés physiques du filament.

La différence E de potentiel aux bords de la lampe restant constante, l'intensité i du courant diminue quand la résistance augmente ; l'énergie dépensée dans le filament, et égale à Ei, diminue aussi. Il en résulte une baisse de la température du filament et partant de l'émission lumineuse, puisque celle-ci augmente à peu près proportionnellement à la quatrième puissance de la température absolue. Ce fait explique en partie la diminution du rendement.

D'autre part la résistance du charbon diminue quand la température

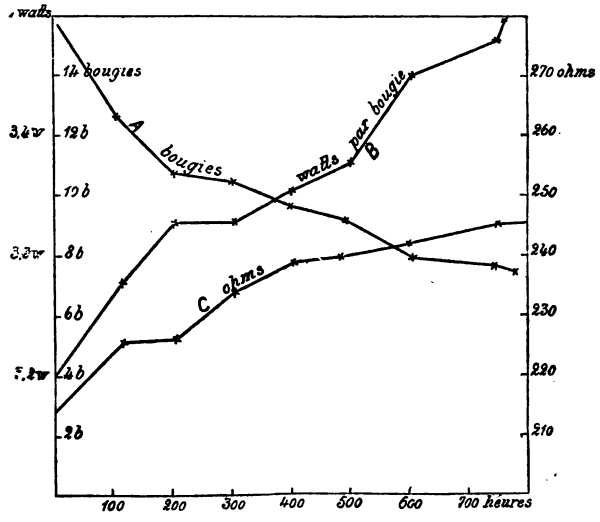


Fig. 76. — Régime normal d une lampe de 16 bougies.

augmente. Si donc la température du filament baisse par suite de l'augmentation de résistance du filament, produite par les modifications de sa section, il en résulte une nouvelle augmentation de résistance et une diminution plus accusée encore de l'énergie absorbée par le filament. Ces deux causes expliquent la diminution graduelle de la température de la lampe et de son rendement.

Si l'on veut maintenir l'intensité lumineuse constante quelle que soit la durée de l'allumage, il faut augmenter graduellement la différence de potentiel aux bornes de la lampe à mesure que la résistance du filament augmente; l'énergie absorbée par le filament augmente donc progressivement avec le temps. Mais la durée de la lampe est alors considérablement diminuée. Les courbes D, B, C (fig. 77) représentent les variations des éléments d'une lampe de 16 bougies main

tenue constamment à cette intensité lumineuse. Les courbes B et C se rapportent aux mêmes éléments que dans la figure précédente, tandis

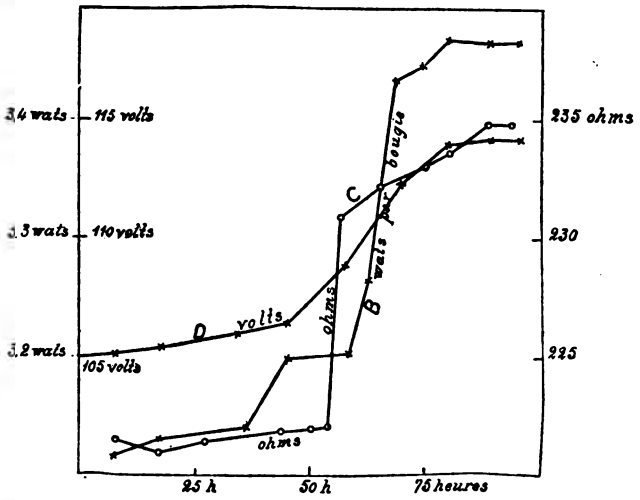


Fig. 77. — Régime d'une lampe maintenue à l'intensité lumineuse normale de 16 bougies.

que la courbe D représente les variations de la différence de potentiel

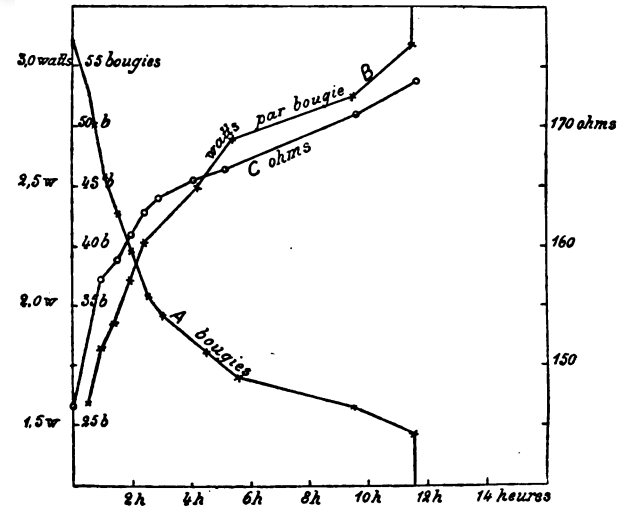


Fig. 78. — Régime d'une lampe de 16 bougies maintenue à une tension de 10 p. 100 trop élevée.

aux bornes. On voit que la lampe n'a pas même pu supporter 100 heures de ce régime. Le filament s'est rompu au bout de 95 heures environ.

Pour montrer comment varient les éléments d'une lampe à incandescence soumise à un régime anormal, nous donnons dans les figures 78 et 79 les courbes de deux lampes de 16 bougies analogues à celles qui ont fourni les deux diagrammes précédents. Les diagrammes de la figure 78 sont relatifs à une lampe de 16 bougies soumise à une différence de potentiel de 10 p. 100 plus élevée que la tension normale. Ceux de la figure 79 se rapportent à une lampe de 16 bougies maintenue à l'intensité lumineuse constante de 64 bougies.

Ces quatre diagrammes donnés par M. Nichols (1) résument suffisamment les phases diverses de la vie d'une lampe à incandescence.

Il faut aussi attirer l'attention sur un fait qui est laissé trop souvent

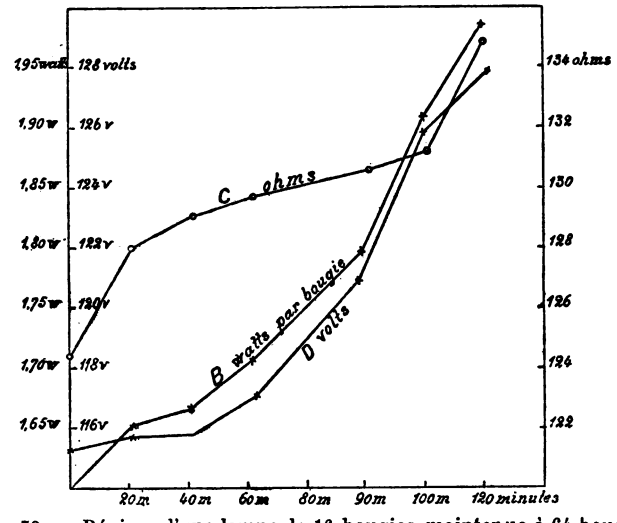


Fig. 79. — Régime d'une lampe de 16 bougies maintenue à 64 bougies.

dans l'ombre, lorsqu'on parle du rendement d'une lampe à incandescence. Lorsqu'il s'agit de décider du mérite d'une lampe, il faut tenir compte du rendement moyen relatif à la durée totale de la lampe et non pas seulement du rendement initial. Ce dernier peut être très élevé pour une lampe donnée, sans que pour cela le rendement moyen soit considérable, car il arrive fréquemment que le rendement diminue très rapidement au bout d'un allumage d'un petit nombre d'heures.

M. Peirce (2) a étudié 94 lampes provenant de quatre fabricants différents et désignées par les lettres A, B, C, D; celles qui ont été fournies par le fabricant lui-même sont désignées par l'indice 2, celles qui ont été achetées dans le commerce par l'indice 1. L'intensité lumineuse mesurée a toujours été l'intensité horizontale moyenne.

(1) *Electr. World.*, 1890, p. 387. — *Lum. él.*, vol. XXXIX, p. 83.
(2) *Electr. World.*, 1889, p. 329. — *Lum. él.*, vol. XXXIII, p. 257.

Les courbes de la figure 80 représentent les variations du nombre de watts exigés par bougie après un allumage plus ou moins long ; ces courbes descendent en général un peu immédiatement après l'allumage pour remonter ensuite lentement.

Le tableau suivant renferme, pour chacun des types de lampes, le nombre de watts par bougie exigé en moyenne pendant la durée des

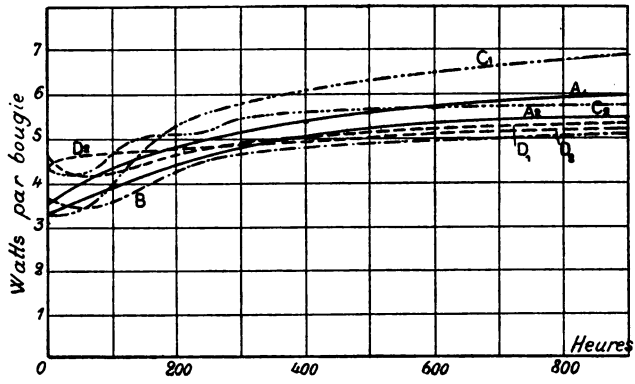


Fig. 80. — Variations du rendement des lampes avec le temps.

essais (850 heures) et l'équivalent mécanique moyen (watts par bougie en pour cent de l'équivalent mécanique initial.

Lampes.	Watts par bougie (moyenne).	Rendement moyen.
A_1	5.25	67 p. 100.
A_2	4.83	64 —
B	4.58	77 —
C_1	5.80	60 —
C_2	5.36	82 —
D_1	4.92	98 —
D_2	4.92	90 —

M. Peirce est en outre arrivé aux conclusions suivantes. Plus le rendement initial de la lampe est élevé, c'est-à-dire plus le nombre de watts exigés par bougie, au début, est faible, plus les variations sont grandes. La courbe des watts par bougie monte assez rapidement tandis que celle du rendement relatif s'abaisse. Si le rendement initial est faible, les variations sont aussi très petites.

La différence est frappante entre les lampes qui exigent au début de 3,5 à 3,8 watts par bougie et celles qui en exigent 4,7 à 5. En fin de compte, le rendement moyen de ces dernières lampes est inférieur à celui des premières. Voici à cet égard quelques chiffres significatifs.

LAMPES QUI EXIGENT PAR BOUGIE.		RENDEMENT MOYEN WATTS PAR BOUGIE.	RENDEMENT MOYEN en p. 100 DU RENDEMENT INITIAL.
De 3.5 à 3.8 watts....	A	5.59	16
	B	5.09	71
	C	4.61	82
De 3.8 à 4.1 watts....	A	6.07	67
	B	5.25	73
	C	4.54	86
	D	4.57	88
De 4.1 à 4.4 watts....	A	5.39	84
	B	4.81	87
	C	4.79	90
De 4.4 à 4.7 watts....	C	5.60	82
	D	4.75	98
De 4.7 à 5.0 watts . .		4.97	101

Durée la plus économique d'une lampe à incandescence.

131. Ce qui caractérise la lampe à incandescence, c'est que son rendement est d'autant plus élevé que l'intensité lumineuse qu'elle émet est considérable. Mais cette augmentation du rendement est obtenue aux dépens de la durée.

Or, dans une installation d'éclairage électrique, les dépenses d'exploitation se composent, abstraction faite des frais généraux, de deux parties, savoir :

1° Le coût de l'énergie W dépensée dans le filament;

2° Les frais de remplacement des lampes usées.

Lorsque le coût de l'énergie diminue, les frais de remplacement augmentent et *vice versâ*. Il y a évidemment une valeur déterminée de la durée de la lampe qui correspond à un minimum de la dépense totale; au lieu de déterminer la durée, on peut aussi calculer le rendement qui rend minimum la dépense totale.

Ces calculs offrent un intérêt réel au point de vue de l'économie d'une installation ; mais il est difficile de traiter la question théoriquement, car les éléments d'une lampe dépendent les uns des autres d'une manière trop compliquée pour qu'il soit possible d'établir des formules simples et réellement pratiques. Cette étude a été entreprise plusieurs fois, d'après des méthodes différentes, en particulier par MM. Die-

trich (1), Picou (2), Ayrton et Perry (3), Desroziers (4), Grassi (5) et dernièrement par M. Simon (6). Mais ces calculs théoriques n'ont pas donné jusqu'à maintenant de résultats réellement utilisables.

Pour étudier cette question d'une manière pratique, il faut partir d'un type de lampe pour lequel on connaît d'une manière suffisamment précise la durée correspondant à divers rendements. On calcule ensuite le total des dépenses d'après le coût de l'énergie à laquelle on doit avoir recours et d'après le prix de la lampe. On obtient ainsi, en faisant ce calcul pour diverses valeurs de rendement comprises entre 1,5 et 4,5 watts, par exemple, celle qui donne la plus grande économie. Ce calcul doit être répété pour chaque cas particulier, car le résultat dépend essentiellement du prix de l'énergie.

Calcul de la teinte d'une lampe à incandescence.

132. L'étude de la lampe à incandescence a permis de conclure que les filaments de deux lampes sont à la même température lorsqu'elles émettent des lumières de composition identique. Cette conclusion a été confirmée par toutes les recherches théoriques et expérimentales auxquelles la lampe à incandescence a été soumise. La composition de la lumière émise se traduit dans la teinte ; la teinte est d'autant plus rougeâtre que la lampe est poussée moins fort ; elle est d'autant plus blanche que le régime de la lampe est chargé. Le simple examen de la teinte d'une lampe à incandescence permet de contrôler le régime auquel elle est soumise.

Le calcul de la teinte d'une lampe à incandescence peut se faire assez facilement en utilisant la méthode photométrique de M. Crova (52) qui consiste, comme on sait, à comparer les intensités des radiations lumineuses voisines de 0,582 μ.

On sait que les intensités lumineuses de deux sources usuelles sont égales lorsque les intensités des radiations voisines de 0,582 μ le sont. On détermine donc l'intensité de la lampe à incandescence en fonction de la lampe Carcel, pour les radiations sus-indiquées. L'intensité ainsi obtenue est égale à l'intensité totale.

On fait ensuite une seconde détermination I', pour les radiations rouges correspondant à 0,657 μ ; il suffit pour cela de faire l'observation à l'aide d'un verre rouge qu'on choisit au spectroscope ; de manière qu'il laisse passer les longueurs d'onde comprises entre 0,726 μ et 0,589, avec

(1) *Elektrotech. Zeitschr.*, août 1884.
(2) *Bull. de la Soc. int. des él.*, vol. I, p. 315, 1884.
(3) *Phil. Mag.*, vol. XIX, 1885, p. 304. — *Lumière électrique*, vol. XVII, p. 10 et 60.
(4) *Bull. de la Soc. int. des él.*, vol. II, 1885. — *Lum. él.*, vol. XVIII, p. 603.
(5) *Atti del. R. Istituto d'incorag. di Napoli*, vol. II, 1889.
(6) *Électricien* du 4 juillet 1891

un maximum bien accusé à 0,657 μ. M. Crova définit alors la teinte rouge de la lampe à incandescence par le rapport $\frac{I'}{I}$.

Voici les valeurs obtenues par M. Crova (1) pour les teintes de diverses lumières :

Soleil.	Arc voltaïque.	Lumière Drummond.	Carcel.
0,50	0,59	0,94 à 0,69	1

Ce qui veut dire qu'à égalité d'intensité avec la lumière de la carcel, la lumière solaire contient seulement les $\frac{50}{100}$ de la lumière rouge contenue dans la lumière de la carcel normale, et ainsi de suite.

En opérant sur plusieurs lampes à incandescence de 50 volts nominaux, M. Crova a trouvé que, le régime variant entre les extrêmes de 30 à 90 watts, la teinte rouge variait de 1,33 a 0,88; dans le premier cas la lampe est très rouge, dans le second elle est surmenée et paraît d'un blanc éblouissant.

Comparant diverses lampes de 50 volts, M. Crova a obtenu l'identité de leurs teintes avec celles de la carcel, en les faisant marcher sous un régime variant, selon les lampes, de 56 à 57,2 watts.

Un régime normal pouvant caractériser chaque lampe serait par exemple le régime qui donne à la lampe la teinte de la carcel ou une fraction déterminée de cette teinte. Le voltage d'une lampe pourrait être défini par le nombre de volts sous lequel elle doit marcher pour donner une teinte égale à celle de la carcel ou une fraction déterminée de cette teinte. Ainsi, avec la teinte 1, les lampes éclairent trop peu; mais elles donnent une belle lumière, sans être surmenées, à la teinte 0,9.

Ces considérations permettraient aux constructeurs de livrer des lampes d'un voltage exactement connu.

Comme exemple, on peut citer trois lampes de 50 watts, A, B, C, qui ont donné les résultats suivants, les watts variant de 30 à 90 :

	A.	B.	C.
Les teintes rouges ont varié de.....	1,33 à 0,88	1,18 à 0,79	1,12 à 0,87
La teinte est celle de la carcel sous le régime de.....	$57^{w},2$	$56^{w},5$	56
Les intensités lumineuses ont varié de.	$0^{c},13$ à $3^{c},68$	$0^{c},12$ à $3^{c},50$	$0^{c},15$ à $3^{c},25$

Au lieu de définir la teinte rouge d'une lumière par le rapport $\frac{I'}{I}$, on pourrait définir son degré d'incandescence par le rapport inverse $\frac{I}{I'}$. L'adoption de cette méthode de contrôle du régime des lampes ne nécessiterait

(1) *Comptes rendus du congrès des électriciens de* 1889, p. 207.

que l'adjonction des deux verres ou cuves colorés pour $\lambda = 0{,}582\ \mu$ et $\lambda = 0{,}657\ \mu$.

Valeurs diverses du rendement des lampes à incandescence.

133. Pour terminer l'étude des lampes à incandescence, nous donnons, surtout à titre de renseignement historique, les principaux résultats relatifs au rendement des lampes à incandescence étudiées aux expositions de Paris et de Munich. Nous pourrions aussi compléter ce tableau par les données relatives aux lampes actuelles; mais ces données, empruntées pour la plupart aux prospectus des fabricants, n'ont pas une valeur scientifique suffisante; on peut d'ailleurs les trouver dans tous les annuaires et formulaires de l'électricien. En outre, il ne faut pas oublier que le rendement initial d'une lampe est loin de la caractériser; son rendement moyen est plus important, et cet élément est donné fort rarement.

DÉSIGNATION DES LAMPES.	INTENSITÉ MOY. en bougies.	AMPÈRES.	VOLTS.	WATTS.	RENDEMENTS.		
					WATTS par bougie.	BOUGIES par cheval.	LAMPES par cheval.
Exposition de Paris (1881).							
Edison A. 16 bougies....	15.38	0.651	89.11	59.11	3.7	196	12.7
— A. 32 —	31.11	0.7585	98.39	76.04	2.4	307	9.9
Swan A.....	16.61	1.471	47.30	79.59	4.15	178	10.7
- B.....	33.21	1.758	54.21	96.70	2.86	262	8.0
Lane-Fox A.....	16.36	1.593	43.63	70.89	3.64	173	10.6
— B.....	32.71	1.815	48.22	89.36	2.76	276	8.5
Maxim A.....	15.96	1.380	56.49	79.39	4.09	151	9.5
— B.....	31.93	1.578	62.27	10.03	3.07	239	7.5
Exposition de Munich (1882).							
Edison A, n° 1.....	18.473	0.678	107.6	74.4	4.0	184	10.0
— A, n° 2.....	21.159	0.809	110.1	90.6	4.2	175	8.2
— B, n° 1.....	15.576	0.896	59.22	54.1	3.4	216	14.0
Maxim L, n° 1.....	17.975	1.344	65.14	89.3	4.86	151	8.4
— L, n° 2.....	21.571	1.353	63.05	86.7	3.9	188	8.6
Petite Swann L, n° 1....	14.909	1.318	39.46	53.0	3.46	212	15.0
Grande Swann L, n° 5...	18.334	1.161	97.65	114.9	6.15	120	6.5
Siemens n° 1.....	17.157	0.946	95.60	92.3	5.2	141	8.1
— n° 2.....	17.170	0.956	100.10	97.6	6.15	120	7.6
— n° 3.....	17.742	0.906	96 99	89.6	5.0	147	8.3
Petite Müller n° 5.....	17.661	1.189	70.95	86.0	4.77	154	8.7
— n° 6.....	22.385	1.305	75.29	99.3	4.38	168	7.5
Müller moyenne n° 1.....	21.338	1.573	89.16	143.1	6.5	113	5.2
— n° 2.....	24.529	1.423	97.75	141.9	5.67	130	5.3
Grande Müller n° 1.....	23.643	1.710	121.20	281.1	8.7	85	3.5
Cruto.....	19.687	3.257	26.62	88.4	4.45	165	8.9

B. — Lampes a arc.

Arc voltaïque.

134. L'arc voltaïque est produit par le passage du courant dans l'air porté à une haute température, entre deux électrodes de charbon. Les premières expériences relatives à l'arc voltaïque ont été faites par Humphry Davy à partir de 1800 (1), mais celles dans lesquelles l'illustre chimiste anglais put obtenir l'arc d'une manière continue datent de 1808 et de 1809.

Davy, ayant pris deux baguettes de charbon taillées en pointe, les mit en contact et fit passer entre elles le courant d'une pile Volta de 2000 éléments. En écartant les deux pointes d'une très petite quantité, il vit se produire entre elles une flamme légèrement convexe qui persista jusqu'à ce que la distance des charbons eût atteint 10 centimètres. L'arc disparut lorsque cette distance devint plus grande, et les pointes se refroidirent rapidement. Les charbons rapprochés lentement ne donnèrent lieu à aucun phénomène lumineux ou calorifique tant qu'ils ne furent pas en contact; mais aussitôt qu'ils se touchèrent, les pointes s'échauffèrent et la flamme jaillit instantanément au moment de leur écartement. Davy donna à cette flamme, dont l'éclat était comparable à celui du soleil, le nom d'*arc voltaïque*, nom qu'elle a conservé jusqu'à maintenant.

Nature et aspect de l'arc voltaïque.

135. L'arc voltaïque résulte de l'incandescence d'un jet de particules détachées des électrodes et projetées dans toutes les directions. Cette projection, lorsqu'on fait usage de courants continus, a principalement lieu d'un pôle à l'autre, et plus particulièrement du pôle positif au pôle négatif. L'électrode positive a une température beaucoup plus élevée que l'autre, et, tandis que le charbon négatif est à peine rouge sombre à quelque distance de l'arc, le charbon positif est rouge blanc sur une assez grande longueur. L'usure de l'électrode positive, pour un temps déterminé, est double de celle de l'électrode négative. C'est cette différence dans l'usure et la température, observée dès le début par les physiciens, qui fit d'abord expliquer le phénomène de l'arc lumineux comme un simple transport de particules du pôle positif au pôle négatif. Aujourd'hui il est bien démontré que, si le transport de l'électrode positive à l'électrode négative prédomine dans l'arc, il n'en existe pas moins un transport très actif de l'électrode négative à l'électrode positive.

(1) *Lum. él.*, vol. IX, p. 218.

L'arc ressemble, en réalité, à une flamme tremblante dont la forme est ovoïde avec des pointes de charbon. De temps en temps, on voit une particule brillante s'élancer d'une électrode à l'autre en produisant une traînée lumineuse. Sur chacun des charbons apparaissent çà et là des globules liquides et incandescents provenant de substances minérales qui se déplacent, glissent jusqu'à la pointe et s'élancent pour gagner l'autre électrode.

Ces globules liquides n'apparaissent pas lorsque les charbons sont chimiquement purs.

Quand l'arc voltaïque se produit dans l'air, les deux tiges de charbon diminuent rapidement de volume parce qu'elles brûlent toutes deux; mais dans le vide, cette combustion n'a pas lieu et l'on voit la pointe positive se creuser et diminuer de poids, tandis que la pointe négative s'allonge et augmente de volume. L'usure est presque nulle et ne résulte que des particules projetées par les deux charbons en dehors de leur action réciproque.

L'arc voltaïque est une portion du circuit électrique jouissant de toutes les propriétés des autres parties du même circuit. Les molécules entraînées constituent entre les deux pointes une chaîne mobile plus ou moins conductrice et plus ou moins chauffée, suivant l'intensité du courant d'une part, la nature et l'éloignement des électrodes d'autre part. Les choses se passent exactement comme si les électrodes étaient réunies par un fil métallique ou une baguette de charbon de faible section, ce qui revient à dire que la lumière produite par l'arc voltaïque et celle obtenue par incandescence proviennent de la même cause, qui est l'échauffement d'un corps résistant intercalé dans le circuit. Matteucci a démontré cette parité entre l'arc voltaïque et les autres parties du circuit électrique en éloignant lentement deux barres de fer mises préalablement en contact : un filet de métal liquide apparaissait d'abord, devenait lumineux, puis se brisait pour faire place à l'arc voltaïque.

En examinant avec attention l'arc voltaïque produit entre deux pointes de charbon par des courants continus, on distingue nettement l'arc et la flamme. L'arc est bleu; il joint les parties brillantes des deux charbons.

La flamme est rougeâtre; elle enveloppe l'arc et lui donne souvent par son interposition une apparence violette. Cette flamme s'allonge parfois beaucoup et va lécher les parois du charbon positif à des distances relativement considérables ; elle est changeante et mobile; elle contribue aux variations d'intensité lumineuse, et, dans certains cas, elle disparaît complètement. C'est alors surtout que l'arc se présente sous la couleur bleue très peu lumineuse qui lui est propre.

Avec des courants de 50 à 70 ampères, les plus intenses dont on fasse usage pratiquement pour alimenter un seul arc, l'aspect se modifie et présente quelques particularités moins connues. Au début, la flamme a

une couleur pourpre aux environs du négatif; puis, quand les charbons sont taillés normalement, on distingue une bande bleue, étroite, sur la surface brillante du positif, et une auréole rouge autour du négatif; la région moyenne de l'arc est blanche.

Quelle que soit au début la forme des baguettes de charbon, elles se taillent d'elles-mêmes pendant la marche; la pointe positive prend l'aspect d'un cône tronqué terminé par une surface concave; la pointe négative prend la forme d'un cône terminé par une pointe mousse. Ces formes sont d'autant plus régulières que les pointes sont bien vis-à-vis l'une de l'autre et que les charbons sont d'une fabrication soignée et exempts de corps étrangers.

L'arc se produit non seulement entre des pointes de charbon, mais entre toutes sortes de substances suffisamment conductrices. Son éclat dépend de l'intensité du courant, de la nature des électrodes et du milieu dans lequel il se produit. Avec du potassium ou du sodium, par exemple, la lumière est plus brillante qu'avec du platine ou de l'or; dans l'air on a plus de lumière que dans les vapeurs mercurielles.

La couleur de l'arc varie avec la substance des électrodes : elle est jaune avec du sodium, blanche avec du zinc, verte avec de l'argent, etc.

L'aspect de l'arc dépend également de la forme des électrodes : entre une pointe de coke positive et une plaque de platine négative, il présente la forme d'un cône; entre deux pointes de charbon, il a la forme d'un œuf ou plutôt d'un cône tronqué, etc.

136. Les renseignements qui précèdent, empruntés au traité d'éclairage électrique de M. Fontaine, s'appliquent à l'arc voltaïque produit par les courants continus. Les conditions du fonctionnement de l'arc alimenté par des courants alternatifs ne sont pas les mêmes.

Il n'y a pas de différence entre les deux charbons qui sont le siège de phénomènes semblables. Ils se taillent tous les deux en pointes. Cependant le charbon supérieur s'use un peu plus rapidemeut que le charbon inférieur par suite du courant d'air ascensionnel qui tend à le consumer sur les bords. Il en résulte des différences sensibles dans la répartition de l'intensité lumineuse.

Ce qui caractérise surtout le foyer à arc alimenté par des courants alternatifs, c'est le bourdonnement assez désagréable qu'il produit; ce bruit est assez intense et ne peut être supprimé. On en diminue l'intensité en entourant la lampe d'un globe fermé.

On ne sait trop à quoi attribuer ce bourdonnement; on pense cependant qu'il est produit en grande partie par les extinctions et allumages rapides de l'arc et par les variations rapides de température qui en résultent (1).

(1) *Nichols*, *Electr. World.*, 1891, vol. XVII, p. 399.

Différence de potentiel aux électrodes de l'arc voltaïque.

137. L'arc voltaïque est caractérisé par une chute considérable de potentiel aux électrodes, chute qui montre que la production de l'arc exige une dépense d'énergie considérable.

Cette différence de potentiel dépend de la nature et du diamètre des charbons ainsi que de la longueur de l'arc; elle est donnée, d'après Edlund, par la formule

$$V = a + bl,$$

a et b étant deux constantes, l la longueur de l'arc. Les divergences entre les physiciens sont encore très grandes relativement à la signification de la constante a.

Pour quelques physiciens, cette constante correspond à une résistance au passage dont le siège se trouve sur l'électrode négative ou dans son voisinage immédiat; d'autres savants, par contre, pensent avec M. Edlund qu'il n'y a pas de résistance au passage appréciable et que la constante a représente une force électro-motrice de sens inverse à celle du courant.

A côté de ces deux opinions il faut mentionner d'autres hypothèses parmi lesquelles celles de M. G. Wiedemann, qui admet que l'arc voltaïque pourrait bien n'être qu'une décharge discontinue, et celle de M. Lecher, qui pense que le courant électrique s'étend dans l'espace en passant d'un charbon à l'autre et ne reste pas confiné au voisinage de leur axe commun.

Entre ces explications si différentes, le mieux est d'admettre que les actions qu'elles ont en vue concourent toutes à la production des phénomènes qui accompagnent l'arc voltaïque.

Il semble cependant que la résistance au passage joue un rôle capital dans la production de l'arc voltaïque, ainsi qu'il résulte des mesures précises faites par Uppenborn et Lecher en particulier.

M. Uppenborn a trouvé par des photographies nombreuses que l'arc voltaïque a la forme d'un tronc de cône dont la base, très large, repose sur le charbon positif, ce qui indique une résistance au passage très grande en cet endroit; la chute de potentiel a donc lieu surtout au passage du courant du charbon positif dans l'air. Ce fait est d'ailleurs confirmé par les mesures directes du potentiel.

Avec des charbons de 12 millimètres et des longueurs d'arc variant entre 6 et 16 millimètres, M. Uppenborn a trouvé pour la constante a une valeur moyenne de 38 volts, formée par une chute de potentiel de 32,5 volts au passage de l'air dans le charbon négatif; M. Lecher a prouvé, en outre, que le potentiel reste constant dans la couche d'air comprise

entre les deux électrodes, même jusqu'à une distance assez considérable de l'axe.

Cette variation discontinue du potentiel n'a lieu qu'avec des électrodes de charbon et ne se constate plus avec des électrodes de fer, de platine, d'argent ou de cuivre.

Les constantes a et b de la formule d'Edlund varient avec l'intensité du courant, ainsi qu'avec la nature et les dimensions des charbons. C'est ainsi que M. Nebel a trouvé les valeurs suivantes pour la différence de potentiel observée avec des charbons de diamètres différents et avec des courants d'intensités différentes; l est exprimé en millimètres.

Intensité du courant.	Charbon de 10 millimètres volts.	Charbon de 12 millimètres volts.	Charbon de 14 millimètres volts.
12 ampères	$39.3 + 2.2l$	$35.2 + 2.6l$	$32.4 + 2.8$
16 —	$39.2 + 2.0l$	$36.1 + 1.4l$	$34.1 + 2.8l$
20 —		$38.0 + 1.9l$	$34.4 + 2.1l$
24 —		$38.6 + 2.1l$	$34.9 + 1.9l$

Avec des charbons de compositions différentes, mais de même diamètre,

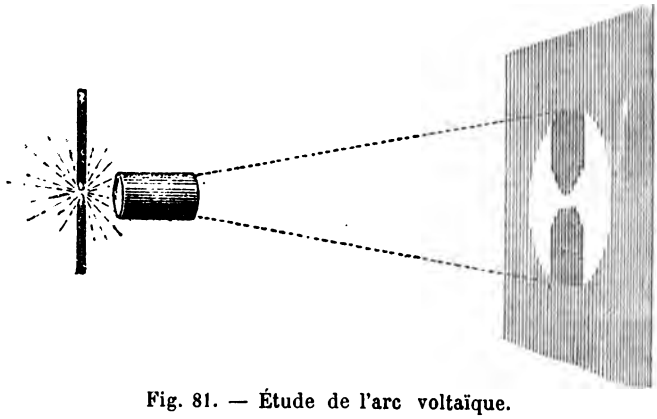


Fig. 81. — Étude de l'arc voltaïque.

alimentés par des courants de même intensité (12 ampères), M. Uppenborn a obtenu les valeurs suivantes pour la différence de potentiel :

Charbon n° 1.....	$35.4 + 2.10l$
— n° 2.....	$39.0 + 1.74l$
— n° 3.....	$40.0 + 2.20l$
— n° 4.....	$41.0 + 2.16l$
— n° 5.....	$45.4 + 1.99l$
Moyenne.....	$40.1 + 2.24l$

Des chiffres qui précèdent et d'autres résultats encore résulte la conclusion que la différence de potentiel aux électrodes diminue à mesure

que le diamètre des charbons augmente, c'est-à-dire à mesure que leur résistance diminue.

Ce fait est du reste utilisé dans les lampes à arc à basse tension dont les lampes Weston, très répandues aux États-Unis, sont un exemple. Cette différence de potentiel varie aussi avec la nature des charbons et peut varier de 10 et même de 15 volts pour des charbons de même diamètre mais de provenances différentes.

L'étude de l'arc voltaïque, forme et longueur de l'arc, aspect des charbons, est rendue très facile en projetant l'ensemble sur un écran blanc, à l'aide d'une lentille divergente. La figure 81 représente la disposition des expériences avec assez de précision pour qu'il soit inutile d'entrer dans des détails.

Nature et fabrication des charbons.

138. La composition des charbons ayant une influence considérable sur les propriétés photométriques de l'arc voltaïque, voici quelques détails sur la fabrication des crayons employés dans l'industrie.

On sait que Davy employait des baguettes de charbon de bois éteint dans l'eau ou dans du mercure : ces baguettes brûlaient assez régulièrement, mais trop rapidement pour être employées d'une manière industrielle. Ce fut Foucault qui remplaça le premier le charbon de bois par les dépôts recueillis sur les parois des cornues à gaz. Le charbon de cornue est beaucoup plus dense que le charbon de bois et résiste plus longtemps à l'action destructive de l'arc voltaïque ; mais sa composition n'est pas uniforme, ce qui produit des variations considérables dans l'intensité lumineuse; ces variations proviennent de la présence de matières étrangères, sels alcalins ou terreux et silice, qui se vaporisent et contribuent à former la flamme qui entoure l'arc. On a cherché à purifier les charbons de cornue à l'aide de divers procédés, mais sans y réussir complètement.

Le procédé de fabrication imaginé par Jacquelain consiste à produire artificiellement le charbon de cornue débarrassé de toute impureté, en mettant au contact des parois incandescentes des cornues, des matières hydrocarburées très denses dont une partie se volatilise et dont le reste se décompose en laissant pour résidu une couche de charbon; en employant des goudrons bien purifiés, on obtient du charbon de cornue d'une pureté parfaite. Les baguettes de charbon Jacquelain ont donné une lumière tranquille, très blanche, et d'environ 25 p. 100 plus intense, à courant électrique égal, que celle donnée par les charbons ordinaires. Ces charbons présentaient l'inconvénient d'être très durs, ce qui exigeait une main-d'œuvre considérable pour le sciage et occasionnait des déchets considérables.

Les procédés dont on se sert actuellement pour fabriquer les baguettes de charbon destinées aux foyers à arc sont dus à MM. Carré et Gauduin; ils consistent à préparer une pâte convenable, à la triturer, à la comprimer, puis à la passer dans une filière, de manière à obtenir des baguettes cylindriques qu'on coupe à la longueur voulue, et à cuire ces baguettes dans un four analogue à ceux employés au traitement des pâtes céramiques.

La composition de la pâte varie suivant les fabricants. M. Carré employait d'abord un mélange de 50 parties de coke très pur en poudre, 20 parties de noir de fumée calciné et 30 parties d'un sirop au sucre de canne et à la gomme. On se sert aujourd'hui, en général, de charbon de cornue pulvérisé, aggloméré avec du goudron de gaz. La qualité du produit dépend du broyage des matières et de la cuisson ; cette dernière se fait à diverses reprises entre lesquelles les charbons sont plongés dans un sirop concentré et bouillant de canne ou de caramel.

Dans le but de maintenir le foyer lumineux au milieu du charbon, ce qui augmente la fixité et la régularité de l'axe, on fait venir un trou central à la filière et on remplit ce trou avec une substance appelée mèche, plus conductrice de l'électricité que le carbone; les crayons à mèche donnent d'excellents résultats; on ne les emploie qu'au pôle positif, vu leur prix relativement élevé.

Afin d'augmenter la durée et la conductibilité des charbons, on les recouvre souvent, par voie électrolytique, d'une couche de cuivre; les charbons cuivrés sont très employés, en Amérique surtout. En Europe on utilise plutôt les crayons nus parce que la lumière est plus régulière. Quant aux charbons nikelés, ils ne sont pas entrés dans l'industrie.

Outre les charbons passés à la filière, comme ceux de M. Carré, on fabrique aussi des charbons moulés. En général les charbons filés sont plus denses que les charbons moulés et conviennent mieux pour les basses tensions qui exigent un courant plus intense et doivent posséder une plus grande conductibilité.

Pour de plus amples détails sur la fabrication des charbons pour lampes à arc, nous renvoyons aux ouvrages spéciaux.

Régulateurs et bougies.

139. La continuité de l'arc voltaïque est obtenue grâce au mécanisme de régulation qui maintient l'écartement des charbons à une distance constante pour une intensité de courant et une différence de potentiel déterminés. Il existe un grand nombre de régulateurs différents qui reposent en grande majorité sur le principe suivant.

Lorsque la longueur de l'arc varie, l'intensité du courant varie également, en sorte que l'intensité diminue quand les charbons s'usent. On

met cette diminution d'intensité à profit pour maintenir les pointes de charbon à un écartement constant dans des limites assez étroites. Pour cela, on intercale dans le circuit un électro-aimant dont l'armature est sollicitée d'un côté par l'action magnétique, de l'autre par un ressort. Quand le courant diminue d'intensité, l'action magnétique diminue et l'armature se meut sous l'influence prépondérante du ressort antagoniste ; on utilise ce mouvement pour déclencher un mécanisme qui rapproche les porte-charbons.

Dans les bougies électriques, la régulation de l'arc voltaïque est obtenue sans régulateur ; elles se composent de deux baguettes de charbon disposées parallèlement et d'une lame de substance isolante placée entre les crayons, le tout réuni en un seul faisceau. Les charbons brûlent sous l'action du courant et ne nécessitent aucun mécanisme pour l'allumage ou le réglage; la longueur de l'arc dépend uniquement de la distance des baguettes et l'allumage s'opère au moyen d'amorces conductrices placées au sommet des pointes, lors de la fabrication.

Nous renvoyons aux traités spéciaux pour tout ce qui concerne les mécanismes divers employés dans les lampes à arc et l'étude des meil leures conditions de fonctionnement.

Historique de la photométrie des lampes à arc.

140. Depuis l'année 1880, où Davy fit jaillir pour la première fois l'arc voltaïque, jusqu'à l'époque où la lumière électrique est entrée dans la phase des applications industrielles, l'étude photométrique des foyers à arc n'a guère été entreprise. On ne peut pas envisager comme une étude complète les recherches de Fizeau et de Foucault en 1843 et 1844, au cours desquelles ces deux physiciens firent une série de comparaisons entre l'action chimique de la lumière solaire, de la lumière électrique et de la lumière oxhydrique. Les résultats obtenus, bien qu'ils aient passé dans tous les traités de physique, n'ont qu'une valeur bien restreinte, car ils se rapportent à l'action de la lumière sur une plaque d'iodure d'argent et non à l'action photométrique proprement dite ; voici ces résultats :

Intensité de la lumière solaire le 11 avril 1844 à 11 h. 15 m., par un ciel extraordinairement clair	1000
Intensité de la lumière solaire, le 20 septembre 1843 à 2 h., par un ciel bleu pâle	751
Intensité de l'arc voltaïque produit par trois séries de quarante-six éléments Bunsen	385
Intensité de la lumière oxhydrique	6.85

La faible action chimique de la lumière oxhydrique engagea Fizeau et Foucault à déterminer directement par une méthode optique l'action photométrique de l'arc voltaïque et de la lumière oxhydrique; le résultat de

cette comparaison fut que la lumière émise par l'arc voltaïque était à la lumière oxhydrique comme 1 est à 32,6, tandis que le même rapport déterminé par les actions chimiques avait été trouvé égal à 1/34,3.

L'égalité des deux résultats amena les deux physiciens à conclure que, au point de vue de pratique, les actions chimiques et photogéniques des sources lumineuses sont équivalentes.

En passant rapidement sur les mesures de Casselmann (1843) qui ont été les premières mesures photométriques faites avec le photomètre de Bunsen, sur celles de Becquerel faites à l'occasion des essais d'éclairage électrique de Lecassagnac et Thiers à Lyon et à la place de l'Étoile à Paris (1855-1857), sur celles que l'introduction dans les phares de la lumière électrique produite à l'aide des machines de l'Alliance a provoquées, on arrive à l'introduction de la machine Gramme dans l'industrie.

A partir de ce moment, le développement chaque jour croissant de l'éclairage électrique a provoqué un grand nombre de mesures photométriques.

Une des premières études photométriques complètes de l'arc voltaïque est celle que M. H. Fontaine fit à l'aide d'un régulateur Serrin alimenté par le courant d'une machine de Gramme. Il faut mentionner également les mesures d'Allard et de Sautter et Lemonnier. Mais c'est à partir de l'Exposition d'électricité de 1881 que les mesures photométriques sont devenues plus nombreuses et plus complètes, en même temps que la régulation plus parfaite des machines et des lampes, ainsi que la bonne qualité des charbons, permettaient d'obtenir une lumière plus fixe. Il suffit de mentionner les essais photométriques des expositions de Paris (1881), de Munich (1882), de Vienne (1883), de Philadelphie (1884), d'Anvers (1885), etc., auxquels il faut ajouter nombre de recherches faites en dehors de toute commission officielle.

Examen théorique des variations de l'intensité lumineuse d'une lampe à arc.

141. Ce qui, au point de vue photométrique, caractérise l'arc voltaïque, ce sont les grandes variations de l'intensité lumineuse suivant la direction des rayons, variations qui sont plus considérables que dans toute autre source de lumière usuelle. Lorsque l'arc voltaïque est alimenté par des courants continus, ces variations sont plus grandes que lorsqu'il est alimenté par des courants alternatifs ; la cause de cette différence doit être attribuée à la part prépondérante prise par le charbon positif dans l'émission lumineuse du foyer à courant continu.

La plus grande partie de la lumière émise par l'arc voltaïque provient des électrodes qui sont portées à l'incandescence ; on estime ainsi que, dans un arc voltaïque alimenté par un courant continu, 5 p. 100

seulement de la lumière totale émise provient de l'arc, une proportion de 10 p. 100 est fournie par le charbon négatif et le reste, soit 85 p. 100, par le charbon positif.

L'intensité du foyer est donc la résultante des intensités produites par l'arc et les charbons. Or, la qualité de la lumière émise par un corps incandescent est proportionnelle au pouvoir émissif de ce dernier ; il faut donc employer une qualité de charbon dont le pouvoir émissif, aux hautes températures, soit aussi grand que possible. On sait que le pouvoir émissif du charbon est très considérable, plus grand, par exemple, que celui de la plupart des métaux ; c'est ce qui explique l'éclat particulièrement brillant de l'arc obtenu avec des électrodes de charbon.

Dans un foyer alimenté par des courants continus, la plus grande partie de la lumière émise provenant de l'extrémité du charbon positif, ce dernier est généralement placé en haut afin que les rayons lumineux soient dirigés vers les surfaces horizontales situées en dessous et qu'il s'agit d'éclairer. Le simple examen des conditions calorifiques de l'arc permet de déduire assez exactement les variations de l'intensité lumineuse avec la direction des rayons.

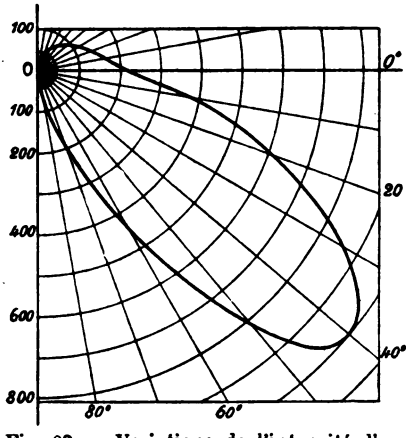


Fig. 82. — Variations de l'intensité d'une lampe à arc avec l'inclinaison.

Supposons que les charbons soient théoriquement terminés par deux troncs de cône égaux; l'arc jaillit entre leurs extrémités, le cratère qui se forme à l'extrémité du charbon positif émet la plus grande quantité de lumière, car la surface d'émission y est la plus considérable et la température la plus élevée. Il n'y a guère que l'arc et les parties latérales des extrémités des charbons qui émettent de la lumière en direction horizontale. En outre, l'ombre portée par les charbons négatif et positif limite d'autant plus rapidement l'émission des rayons lumineux que la longueur de l'arc est plus courte; l'ouverture du cône lumineux est d'autant plus grande que l'arc est plus long. Mais lorsque la longueur de l'arc augmente, la température des charbons baisse et l'intensité de l'émission lumineuse diminue.

Cet examen sommaire montre donc que l'intensité lumineuse doit être nulle en direction verticale, passer par un maximum pour une inclinaison déterminée au-dessous de l'horizon et par un minimum dans le plan horizontal, pour augmenter rapidement et décroître aussi rapidement au-dessus de l'horizon. Cette dernière conclusion seule n'est pas entièrement

confirmée par les observations photométriques par suite des causes diverses qui modifient la régularité de l'émission lumineuse du charbon négatif et surtout par le fait que la lumière émise par l'arc en direction horizontale est plus intense que celle que le charbon négatif émet vers le haut. Aussi le minimum dans le plan horizontal n'existe pas toujours et la diminution continue régulièrement au-dessus de l'horizon.

Le diagramme qui représente les variations de l'intensité lumineuse avec l'inclinaison des rayons est bien connu ; celui de la figure 82 résume toutes les mesures photométriques faites sur les lampes à arc à l'exposition d'Anvers.

Variations de l'intensité lumineuse avec l'azimut.

142. Puisque, dans l'arc voltaïque, tout est en général symétrique par rapport à l'axe des charbons, l'intensité lumineuse doit être indépendante de l'azimut du rayon, c'est-à-dire que la surface photométrique doit être une surface de révolution. C'est ce qui devrait avoir lieu, en effet, si les charbons étaient homogènes et bien centrés et si le régulateur fonctionnait toujours régulièrement. Malheureusement ces conditions ne sont jamais remplies d'une manière rigoureuse, de sorte qu'il n'est pas exact d'admettre que l'intensité soit indépendante de l'azimut, bien que cette hypothèse soit généralement acceptée dans la pratique. Le centrage des charbons, en particulier, offre les plus grandes difficultés; quel que soit le soin avec lequel les charbons sont dressés, ils subissent toujours une légère flexion après un fonctionnement de quelques instants, ce qui produit un déplacement latéral des pointes et une perturbation dans la répartition de l'intensité lumineuse.

Cette perturbation est beaucoup plus sensible qu'on ne le croit généralement. Elle a été signalée par tous ceux qui ont fait des mesures photométriques sur les lampes à arc. Elle a été étudiée récemment avec soin par M. Wedding (1). Cet ingénieur a mesuré dans deux azimuts différant de 180° les intensités lumineuses pour des inclinaisons variables: il a étudié en tout 9 paires de charbons fonctionnant régulièrement avec un courant de 14 ampères. Il a en outre photographié les pointes de charbon au cours de chacun de ces essais, afin de constater la cause des irrégularités.

Le tableau suivant reproduit les mesures de M. Wedding; celles-ci confirment un résultat constaté par les mesures de Paris et d'Anvers, à savoir que les variations de l'intensité lumineuse maxima sont beaucoup plus faibles que celles de l'intensité horizontale. Dans ce tableau les intensités lumineuses sont exprimées en bougies.

(1) *Elektr. Zeitschrift*, 1889, p. 337.

seulement de la lumière totale émise provient de
de 10 p. 100 est fournie par le charbon négatif
par le charbon positif.

L'intensité du foyer est donc la résult
l'arc et les charbons. Or, la qualité
incandescent est proportionnelle
faut donc employer une quali
aux hautes températures, soi
voir émissif du charbon
que celui de la plupar
culièrement brillan

Dans un foye

			BOUGIES. droite.	θ	INTENSITÉ moyenne sphérique.
			1860	40°	1246
		5	2110	39	1246
		46	1890	42	1114
		42	2310	46	1260
		45	2500	41	1355
	0	42	2180	41	1239
	2020	42	2480	38	1359
	2010	43	2990	43	1179
171	1710	44	2000	43	1056
250	1870	43°	2158	41°	1228

Les courbes qui représentent les résultats détaillés de ces mesures montrent que la distribution réelle de l'intensité lumineuse de l'arc voltaïque est des plus irrégulières; la surface photométrique est loin d'être une surface de révolution. Dans les calculs basés sur les intensités lumineuses des foyers électriques, il faut donc se contenter d'une approximation grossière.

Variations de l'intensité lumineuse avec l'inclinaison.

143. Cet élément photométrique des lampes à arc est le mieux connu ; la courbe qui représente ces variations diffère relativement peu d'une lampe à l'autre.

M. Wybauw a combiné entre elles toutes les mesures photométriques des lampes à arc faites à l'exposition d'Anvers en 1885, et il en a déduit une courbe moyenne représentant les variations de l'intensité lumineuse avec l'inclinaison; ce diagramme est reproduit par la figure 82.

La courbe qu'on obtient se rapproche sensiblement d'une ellipse dont l'axe est le rayon à 40° ; elle présente une décroissance à peu près symétrique vers le haut et vers le bas, mais très faible aux environs de l'angle de 40°. Les valeurs moyennes déduites de 26 lampes différant par leur construction et par leur régime s'écartent très peu des valeurs particulières de chaque lampe, l'intensité maximum étant représentée par 1000.

Le tableau suivant donne les valeurs de l'intensité pour les inclinaisons comprises entre 0° et 70° au-dessous de l'horizon et entre 0° et 60° au-dessus (θ négatif).

INCLINAISON θ.	INTENSITÉ LUMINEUSE	
	OBSERVÉE.	CALCULÉE.
.....	48	28
.....	110	104
.....	208	208
.....	401	421
.....	612	629
.....	871	824
.....	1000	1000
.....	807	800
.....	457	457
40°.....	188	206

144. Ces résultats sont confirmés par toutes les mesures postérieures à celles d'Anvers ; leur étude approfondie permet de formuler les conclusions suivantes.

Dans la généralité des lampes à arc à courant continu, on peut, relativement à la distribution de l'intensité lumineuse autour du foyer lumineux, distinguer sur la sphère unité quatre zones bien définies.

Dans l'hémisphère supérieur, qui ne reçoit qu'une faible partie de la lumière totale, l'intensité lumineuse varie à peu près proportionnellement à $\sin\theta$; elle peut donc être représentée par $i' = H(1 - \sin\theta)$, H étant l'intensité horizontale et θ étant positif au-dessus de l'horizon.

Dans l'hémisphère inférieur, on distingue d'abord une zone (entre 0 et 40°) dans laquelle l'intensité lumineuse est de la forme

$$i'' = H + a \sin\theta,$$

θ étant compté positivement au-dessous de l'horizon.

Ensuite une zone plus ou moins étroite (entre 40 et 45°), dans laquelle les variations de l'intensité lumineuse sont très faibles, ce qui permet d'écrire $i''' = M$, M étant l'intensité maximum ; cette zone peut être plus ou moins large suivant la nature du cratère du charbon positif.

Enfin une zone dans laquelle l'intensité décroît suivant la loi :

$$i^{IV} = b - c \sin\theta.$$

L'intensité lumineuse I est donc représentée par la formule complexe :

$$I = [H(1 - \sin\theta)]_{0°}^{90°} + [H + a \sin\theta]_{0°}^{\theta_1} + [M]_{\theta_1}^{\theta_2} + [b - c \sin\theta]_{\theta_2}^{90°}.$$

Cette formule doit être comprise avec cette restriction qu'on n'emploie que le terme seulement dont les limites renferment l'inclinaison pour laquelle on veut calculer l'intensité lumineuse.

Les limites θ_1 et θ_2 peuvent être plus ou moins rapprochées, suivant la rapidité avec laquelle l'intensité lumineuse varie dans le voisinage du maximum.

Lorsque les variations de l'intensité lumineuse sont sensiblement les mêmes avant et après le maximum, du moins dans le voisinage immédiat, on peut supprimer le terme constant, ce qui revient à supposer $\theta_1 = \theta_2$. On a alors :

$$I = [H(1 - \sin\theta)]_{0°}^{90°} + [H + a\sin\theta]_{0°}^{\theta_1} + [b - c\sin\theta]_{\theta_1}^{90°}.$$

On peut facilement exprimer les constantes a, b, c en fonction des valeurs de H, M, θ_1 et θ_2.

Pour $\theta = \theta_1$ on doit avoir :

$$I = M$$

d'où

$$M = H + a\sin\theta_1$$

c'est-à-dire

$$a = \frac{M - H}{\sin\theta_1}.$$

On a de même :

$$I = M$$

pour

$$\theta = \theta_2$$

et

$$I = 0$$

pour

$$\theta = 90°$$

donc

$$\begin{aligned} b - c\sin\theta_2 &= M \\ b - c &= 0 \end{aligned}$$

d'où l'on tire :

$$b = c = \frac{M}{1 - \sin\theta_2}.$$

La formule complète devient alors

$$I = H[1 - \sin\theta]_{0°}^{90°} + \left[H + \frac{M - H\sin\theta}{\sin\theta_1}\right]_{0°}^{\theta_1} + [M]_{\theta_1}^{\theta_2} + \left[\frac{M}{1 - \sin\theta_2}(1 - \sin\theta)\right]_{\theta_2}^{90°}.$$

En admettant dans la pratique que l'intensité lumineuse est maximum et sensiblement constante pour les inclinaisons comprises entre 40° et 45°, on ne s'écarte pas beaucoup de la vérité ; la formule peut donc s'écrire :

$$I = [H(1 - \sin\theta)]_{0°}^{90°} + [H + 1{,}5557(M - H)\sin\theta]_{0°}^{40°} + [M]_{40°}^{45°} + [3{,}413.M(1 - \sin\theta)]_{45°}^{90°}.$$

En remplaçant H et M par les valeurs moyennes déduites des expériences d'Anvers, on obtient :

$$I = 208[1 - \sin\theta]_{0°}^{90°} + [208 + 1232\sin\theta]_{0°}^{40°} + [1000]_{40°}^{45°} + 3413\,[1 - \sin\theta]_{45°}^{90°}.$$

C'est à l'aide de cette formule qu'ont été calculées les valeurs inscrites dans la troisième colonne du tableau précédent (page 213). En se reportant à ce tableau, on voit que la concordance est aussi grande que possible.

On peut, à l'aide d'une formule analogue, représenter assez exactement

l'intensité lumineuse des lampes à arc d'un système quelconque, pourvu qu'elles soient alimentées par des courants continus.

Remarquons toutefois que les résultats individuels peuvent présenter des différences très considérables si l'on se borne à faire des mesures dans un seul azimut; pour obtenir une concordance suffisante, il faut effectuer les mesures au moins dans quatre azimuts différents, de manière à faire disparaître l'influence accidentelle des irrégularités dans le fonctionnement de la lampe ou dans l'usure des charbons. M. Rousseau insiste d'ailleurs avec force sur ce point dans son rapport sur les essais d'Anvers, et les mesures de M. Wedding mentionnées plus haut confirment cette conclusion.

Intensité moyenne sphérique.

145. Dans ce qui précède, il a été fait abstraction de l'intensité moyenne sphérique. On a, jusqu'à maintenant, donné une trop grande valeur à cet élément, qui ne joue qu'un rôle assez restreint dans les problèmes d'éclairage par les lampes à arc à foyer nu.

L'élément le plus important d'un foyer à arc, c'est l'intensité maximum; la connaissance de l'intensité horizontale et de l'intensité maximum permet de calculer facilement l'intensité pour une inclinaison donnée, et c'est cette dernière qu'il faut employer s'il s'agit de calculer l'éclairement en un point donné. L'intensité moyenne sphérique ne doit pas être employée, dans les calculs d'éclairement, aux lieu et place de l'intensité effective pour l'inclinaison considérée.

L'intensité moyenne sphérique donne un critérium relatif au coefficient de transformation de la lampe, à son rendement si l'on veut, mais c'est tout. De deux foyers de même intensité moyenne sphérique, celui-là sera le meilleur qui aura l'intensité maximum la plus élevée, puisque ce sont les rayons maxima qui déterminent la limite d'action du foyer, l'éclairement étant toujours suffisant au pied du candélabre, surtout si l'on emploie un réflecteur.

Cependant, il est quelquefois utile de connaître l'intensité moyenne sphérique d'une lampe donnée, d'autant plus que ce coefficient est facile à calculer par une formule approximative assez précise.

Le calcul exact de l'intensité moyenne sphérique est très laborieux, puisqu'il exige des mesures précises sous un grand nombre d'inclinaisons suffisamment rapprochées. Cependant, si l'on désigne par H l'intensité horizontale, par M l'intensité maxima, on peut représenter l'intensité moyenne sphérique S par la formule proposée déjà à l'Exposition d'électricité de Paris, en 1881 :

$$S = \frac{H}{2} + \frac{M}{4}.$$

En mettant cette formule sous la forme

$$S = \frac{H}{4} + \frac{H+M}{4},$$

le premier terme représente assez approximativement l'intensité moyenne pour l'hémisphère supérieur, et le second l'intensité moyenne pour l'hémisphère inférieur.

Le tableau suivant, établi d'après le rapport officiel de M. Rousseau, représente les résultats des essais photométriques d'Anvers, sur des lampes de divers systèmes et avec des charbons de natures différentes (charbons Siemens, Schmelzer).

LAMPES.	INTENSITÉ (EN CARCELS).				ÉCARTS EN 0/0 O — C.
	HORIZONTALE.	MAXIMUM.	MOYENNE SPHÉRIQUE.		
			Observée.	Calculée.	
1 Jaspar	102	557	198	188	+ 5
2 Brush	102	522	192	182	+ 5
3 Gramme	72.5	471	166	154	+ 7
4 Piette et Krizik	92	446	161.5	158	+ 2
5 Crompton	60	373	132	123	+ 7
6 De Puydt	61	362	120	121	— 1
7 Dulait	73	423	137	142	— 4
8 Gramme	95.5	265	119	114	+ 4
9 —	54	265	96	93	+ 3
10 Piette et Krizik	56	276	100	97	3
11 Cramer et Dornfelt	57	185	68	75	— 10
12 Piette et Krizik	36	190	66	66	0
13 Pieper	25	120	43	43	0
14 Brush	42	209	70	73	— 4
15 Piette et Krizik	34	206	59	68	— 15
16 —	26.5	177	58	58	0
17 Gulcher	44.5	207	61	74	— 21
18 Pieper	21	100	35	35	0
19 —	17	94	31.5	32	— 2
20 —	19	72	28	27.5	+ 2
21 Brush	32	102	35	41.5	— 12
22 Gramme	22	145	48	47	+ 2
23 Pieper	10	52	18	18	0
24 —	9.4	60 6	16.3	19.8	— 21

La dernière colonne de ce tableau donne en pour cent les écarts entre les résultats fournis par l'observation directe, et ceux calculés à l'aide de la formule précédente.

La moyenne des écarts est de 5,7 p. 100; celle des écarts positifs (au nombre de 9) de 5,2 p. 100, et celle des écarts négatifs (10 en tout) de 9 p. 100.

M. Uppenborn a appliqué aussi la règle ci-dessus à des mesures photométriques faites sur sept lampes différentes; les résultats de cette comparaison sont renfermés dans le tableau ci-dessous.

LAMPES. (AUTORITÉ : UPPENBORN).	INTENSITÉ (BOUGIES) HORIZONTALE.	MAXIMUM.	MOYENNE SPHÉRIQUE Observée.	Calculée.	ÉCARTS EN 0/0 O — C.
1	250	1464	470	491	— 4
2	456	3250	1145	1040	+ 9
3	560	3071	1221	1048	+ 14
4	744	1227	692	679	+ 2
5	122	810	274	271	+ 1
6	586	2100	802	818	— 2
7	935	1150	767	755	+ 2

Enfin, M. Marks a fait également usage de cette formule pour discuter ses mesures personnelles; il a, en outre, repris un certain nombre d'observations diverses, faites en Amérique par plusieurs électriciens. Tous ces résultats si divers par leur origine sont renfermés dans le tableau suivant; ils concordent parfaitement avec la formule.

LAMPES. (AUTORITÉ : MARKS).	INTENSITÉ (EN BOUGIES) HORIZONTALE.	MAXIMUM.	MOYENNE SPHÉRIQUE Observée.	Calculée.	ÉCARTS EN 0/0 o — c.
Weston	344	609	318	324	+ 7
—	299	576	295	293	+ 1
—	576	1235	640	597	+ 7
Brush	313	1395	609	504	+ 17
Ball	233	534	240	249	— 4
Brush (1 200 bougies)	180	617	263	244	+ 7
— (2 000 bougies)	389	1380	653	539	+ 17
Van Depoele	451	1377	574	569	+ 1
—	333	1155	470	455	+ 3
Western Electric	263	355	186	220	— 18
Thomson-Houston	227	1080	425	383	+ 10
—	222	636	288	267	+ 7
—	382	1131	525	474	+ 9
Weston	594	1183	514	593	— 16
—	475	871	400	436	— 9

La concordance entre l'observation et le calcul est assez grande, un peu moins cependant que dans les mesures précédentes; la moyenne des écarts est de 9 p. 100 au lieu de 5,7 p. 100.

Tous ces résultats donnent donc à la formule

$$S = \frac{H}{2} + \frac{M}{4}$$

une valeur pratique réelle; on peut l'appliquer dans tous les cas, avec

d'autant plus de sûreté que les valeurs de H et de M ont été déduites de mesures effectuées dans plusieurs azimuts.

On pourrait même simplifier cette formule en remarquant que, d'après les mesures de M. Rousseau, relatives à 24 lampes différentes, l'intensité horizontale est égale à 0,208 fois l'intensité maximum ; on a donc approximativement $H = 0{,}2M$, d'où il résulte

$$S = 0{,}35M.$$

Cependant, cette formule n'est pas sûre, car l'intensité horizontale est un élément qui varie considérablement d'une lampe à l'autre; il vaut mieux s'en tenir à la formule complète.

Emploi de globes opales et de réflecteurs.

146. On emploie assez rarement les foyers à arc voltaïque à feu nu, car la lumière émise est trop crue dans le voisinage de la lampe et l'effet total d'illumination est moins avantageux. Les foyers à feu nu s'emploient dans l'éclairage des chantiers de construction et dans l'éclairage des grands espaces découverts.

Dans l'éclairage des rues, l'emploi des globes opalescents a prévalu, bien qu'ils absorbent une proportion assez élevée de lumière, estimée, d'après M. von Hefner-Alteneck (1), à

15 p. 100	pour le	verre	d'albâtre.
20	—	—	opale.
30 à 60	—	—	laiteux.

Le plus souvent, ces globes sont surmontés d'un réflecteur destiné à rejeter vers le sol les rayons lumineux de l'hémisphère supérieur. La présence du globe et du réflecteur modifie du tout au tout la répartition des rayons lumineux.

M. Uppenborn a trouvé que les globes sphériques donnent de meilleurs résultats, au point de vue photométrique, que les globes elliptiques. L'absorption est plus faible et la répartition de l'intensité lumineuse plus avantageuse.

Le globe opalescent qui entoure le foyer à arc n'absorbe pas la lumière d'une manière uniforme; l'intensité lumineuse des régions du globe qui correspondent à l'intensité maximum est sensiblement diminuée, tandis que celle des régions qui correspondent au minimum est augmentée. Le globe devient lumineux par lui-même et joue le rôle de foyer.

La nature du globe, ses dimensions et sa forme, ne sont pas sans importance. On admet généralement que le globe doit être petit, comme celui de la lampe Cance, par exemple, de façon à remplacer pour l'œil

(1) *Lumière électrique*, vol. X, p. 403.

et pour les ombres le point trop brillant par un disque dont l'éclat semble à peu près uniforme et qui apparaît comme le soleil sous un très petit angle. Si l'on prend un globe trop grand, cet effet est complètement manqué. On voit au milieu un point brillant, puis la surface du globe dont l'éclat est réparti suivant des zones plus ou moins lumineuses.

Le verre dont le globe est formé doit être assez opaque pour obtenir un effet diffusant assez intense et absorber le moins possible de lumière. Ce résultat est obtenu en prenant un verre incolore ayant sur une de ses faces une couche très mince de verre laiteux assez transparente pour que, dans le jour, la lampe étant éteinte, on distingue très nettement les contours des charbons à travers le globe. On obtient avec ces verres un aussi bon résultat qu'avec les verres Cance, tout en perdant beaucoup moins de lumière, les globes Cance étant très épais.

Les résultats les plus précis qu'on possède sur l'emploi des globes et des réflecteurs avec les lampes à arc sont ceux obtenus par M. Wedding (1) à la suite d'une enquête sur l'éclairage à arc des rues de Berlin.

L'adjonction des globes différents I, II et III aux lampes à arc de 14 ampères, mentionnées au paragraphe 142, a donné les résultats suivants :

NUMÉRO DU GLOBE.	INTENSITÉ HORIZONTALE.	INTENSITÉ MAXIMUM.	INCLINAISON du MAXIMUM.	INTENSITÉ HÉMISPHÉRIQUE moyenne.	AFFAIBLISSEMENT EN P. 100.
I	419	970	35°	710	41
II	519	1093	37°	777	40
III	497	715	35°	590	53

La courbe qui représente les variations de l'intensité lumineuse de la lampe munie d'un globe et d'un réflecteur en fer-blanc étamé et poli a la même forme que la courbe de la lampe à feu nu; les dimensions sont un peu plus grandes, ce qui naturellement correspond à une augmentation de l'intensité hémisphérique moyenne.

On a obtenu en effet avec le réflecteur et le globe II :

Intensité horizontale	548
— maximum (à 38°)	1207
— hémisphérique moyenne	865

Sans globe et sans réflecteur l'intensité hémisphérique moyenne est de 1278. La diminution est donc de 32 p. 100 au lieu de celle de 40 p. 100 constatée sans le réflecteur.

L'emploi du globe opalescent et du réflecteur empêche de prendre dans les calculs l'intensité réelle au lieu de l'intensité hémisphérique

(1) *El. Zeitschr.*, 1889, p. 338.

moyenne, car il n'est pas possible d'exprimer simplement l'intensité lumineuse en fonction de l'inclinaison. Dans ce cas, il est tout indiqué de prendre l'intensité hémisphérique moyenne de l'hémisphère inférieur et de traiter le foyer comme un foyer uniforme.

Variations de l'intensité lumineuse avec l'intensité du courant.

147. Pour établir une relation entre l'intensité lumineuse d'une lampe à arc et l'énergie dépensée dans la lampe, il faut considérer celui des éléments photométriques de la lampe qui est le plus constant, savoir l'intensité lumineuse maximum. Les mesures photométriques les plus variées ont, en effet, toujours prouvé que l'intensité lumineuse maximum est la moins sujette aux variations brusques qui sont, par contre, si sensibles sur l'intensité horizontale.

L'énergie dépensée dans la lampe se décompose en deux parties, savoir celle qui est employée au réglage de la lampe, et celle qui entretient l'arc voltaïque; on sait que la perte de potentiel due au réglage de la lampe s'élève, en moyenne, à 15 volts sur 60, soit 25 p. 100. Une lampe absorbe 60 à 65 volts, tandis que l'arc lui-même n'en absorbe que 45 à 50. Au point de vue de l'intensité lumineuse, c'est la partie de l'énergie dépensée dans l'arc qui doit seule entrer en jeu; en appelant donc V la différence de potentiel entre les deux charbons de la lampe, i l'intensité du courant, l'énergie dépensée dans l'arc voltaïque est égale à Vi.

Le problème consiste donc à trouver une relation entre l'intensité lumineuse maximum Im et le travail Vi.

On peut, cependant, la simplifier. Dans la pratique, les lampes fonctionnent toujours à une différence de potentiel qui est sensiblement constante, même lorsque le réglage est fait à courant constant. La grande majorité des lampes marchent à une différence de potentiel comprise entre 45 et 50 volts. Il existe, cependant, des lampes qui marchent à 37 ou 40 volts, et d'autres, dites à basse tension, auxquelles suffit une différence de potentiel de 30 volts environ. On peut donc admettre une valeur constante pour V, de telle sorte que le problème se réduit simplement à trouver une relation entre l'intensité lumineuse maximum Im et l'intensité du courant i. Mais, pour cela, il faut déterminer les constantes de cette formule pour chaque groupe particulier; on peut distinguer trois groupes principaux, dans lesquels nous classerons les lampes à arc : d'abord, le groupe des lampes à haute tension (50 volts en moyenne), celui des lampes à tension moyenne (40 volts), et celui des lampes à basse tension (30 à 35 volts).

L'examen même sommaire des résultats des principales mesures photométriques auxquelles les lampes à arc ont été soumises permet de conclure que l'établissement d'une *formule de rendement* est très difficile,

par suite de l'influence des qualités particulières de chaque lampe et de la nature des charbons sur l'intensité lumineuse; en outre, il faut tenir compte du fait que l'unité photométrique en fonction de laquelle les résultats sont donnés est souvent mal définie; on dit simplement que l'intensité lumineuse est exprimée en bougies, sans indiquer de quelle espèce de bougie il s'agit, ni des conditions sous lesquelles la bougie est employée: or, il existe entre les valeurs des diverses bougies des différences pouvant aller jusqu'à 20 p. 100. De là, une nouvelle source de difficultés pour établir une formule donnant une relation même approchée entre l'intensité lumineuse et l'intensité du courant.

Nous ne ferons que mentionner pour mémoire deux règles empiriques données vers 1880 par Maxim et par Gravier pour calculer l'intensité lumineuse de l'arc en mesurant simplement la surface du cratère du charbon positif ou la consommation horaire de charbon. D'après M. Maxim, pour obtenir l'intensité lumineuse exprimée en bougies, il suffit de multiplier la surface du cratère, exprimée en centièmes de pouce et élevée au carré, par le coefficient 10. M. Gravier calcule en carcels l'intensité lumineuse horizontale d'une lampe à arc en multipliant le volume du charbon consommé par heure par un coefficient qui est le même pour les charbons de même qualité. Il est inutile de dire que ces deux procédés n'ont aucune valeur pratique ou scientifique.

M. Tischendœrfer (1) a donné une formule qui, selon son dire, représente exactement les variations de l'intensité lumineuse d'une lampe à arc avec l'intensité du courant. Dans cette formule, bien que l'auteur ne le dise pas expressément, il s'agit de l'intensité lumineuse maximum exprimée en bougies, l'intensité du courant étant exprimée en ampères. Cette formule est

$$I_m = 100\left[i + \left(\frac{i}{4}\right)^2\right] - 200;$$

l'auteur ne dit pas sur quelles mesures il s'est basé pour calculer cette formule, ni entre quelles limites elle est valable.

De prime abord, on peut dire que cette formule représente assez exactement les valeurs données par l'observation directe, puisqu'elle renferme deux constantes arbitraires et trois termes indépendants. Mais comme l'auteur ne dit pas sur quelles mesures il a basé ses calculs, ou si cette formule est une simple règle empirique, il faut la comparer avec l'observation directe avant de formuler un jugement définitif sur sa valeur; c'est ce qui est fait dans le tableau de la page 224.

148. Nous avons établi une *formule de rendement photométrique*, déduite uniquement de l'expérience (2). A cet effet, nous avons choisi les

(1) *Elektr. Zeitschr.*, 1890, p. 304.
(2) *Lumière électrique*, vol. XXXVII, p. 408.

observations photométriques les plus précises, faites dans les mêmes conditions et à l'aide du même étalon photométrique, afin d'éliminer autant que possible les erreurs provenant des réductions à la même unité et les erreurs personnelles. Or, à notre avis, ce sont les observations faites par M. Rousseau, lors de l'Exposition d'Anvers, qui remplissent le mieux les conditions précédentes.

Ces observations sont au nombre de vingt-quatre, en faisant abstraction de quelques-unes plus ou moins incertaines; l'intensité du courant a varié entre 4 et 20,7 ampères, l'intensité lumineuse maximum entre 52 et 57 carcels. Ces observations sont reproduites dans le tableau suivant; les numéros d'ordre sont les mêmes que ceux du tableau de la page 216.

LAMPE.	INTENSITÉ DU COURANT i	DIFFÉRENCE DE POTENTIEL V	INTENSITÉ LUMINEUSE MAXIMUM I_m (CARCELS)		ÉCARTS O — C	WATTS PAR CARCEL SPHÉRIQUE.
			Observée.	Calculée.		
1	20.7	47.5	557	583	— 26	4.96
2	19.0	50.6	522	519	+ 3	5.00
3	15.9	46.2	471	417	+ 54	4.43
4	15.6	46.4	446	407	+ 39	4.48
5	14.9	47.7	373	386	— 13	5.38
6	14.8	44.9	362	382	— 20	5.53
7	14.6	47.0	423	376	+ 47	5.00
8	12.9	45.5	265	325	— 60	4.92
9	12.5	47.3	265	313	— 48	6.13
10	10.8	45.5	276	265	+ 11	4.91
11	8.6	47.6	185	205	— 20	5.99
12	8.2	47.5	190	195	— 5	5.93
13	8.0	38.5	120	»	»	7.22
14	8.0	46.3	209	190	+ 19	5.28
15	7.9	48 0	206	187	+ 19	5.43
16	7.6	44.9	177	179	— 2	5.91
17	7.6	46.0	207	179	+ 28	5.78
18	7.0	38.4	100	»	»	7.70
19	6.1	38.2	94	»	»	7.37
20	6.0	38.5	72	»	»	8.11
21	6.0	47.1	102	140	— 38	8.12
22	5.6	46.2	145	130	+ 15	5.38
23	4.2	37.0	52	»	»	8.66
24	4.0	38.4	60	»	»	9.45

Les lampes Pieper fonctionnent à une différence de potentiel de 35 à 40 volts seulement, tandis que les autres lampes exigent 40 à 50 volts; il faut exclure les résultats qu'elles ont fournis, puisque ce sont des lampes de tension moyenne, tandis que les autres sont de haute tension.

Nous avons posé :

$$I = x + yi + zi^2$$

x, y et z étant des coefficients à déterminer, de manière que la formule ci-dessus reproduise le plus fidèlement possible les résultats expérimentaux.

Chaque observation fournit une équation; on obtient ainsi autant d'équations que d'observations, savoir dix-huit. En appliquant le calcul des moindres carrés à ce système d'équations, on obtient

$$z = 0,3815$$
$$y = 19,666$$
$$x = 7,93$$

et pour la formule cherchée l'expression

$$I_m = 7,93 + 19,666i + 0,3815i^2. \qquad (I)$$

A l'aide de cette formule, on a calculé l'intensité lumineuse maximum I_m correspondant aux dix-huit observations du tableau, et on a obtenu les valeurs inscrites dans la cinquième colonne. Les nombres renfermés dans l'avant-dernière colonne sont les erreurs résiduelles, c'est-à-dire les écarts entre le calcul et l'observation. Dans la dernière colonne nous avons inscrit les valeurs de l'équivalent mécanique de la carcel correspondant à chaque lampe.

Par conséquent, la formule ci-dessus représente aussi fidèlement que possible les variations de l'intensité lumineuse avec l'intensité du courant, telles, du moins, qu'elles résultent des expériences d'Anvers. Remarquons que ces expériences ont porté sur des lampes de différents systèmes usant des charbons de natures différentes; il en résulte une plus grande généralité pour la formule, bien que les erreurs résiduelles eussent été plus faibles, si l'on avait opéré sur des lampes du même fabricant, employant toutes des charbons de même nature.

La formule s'applique à des lampes à arc en régime normal et marchant à une différence de potentiel voisine de 48 volts; elle peut s'appliquer à des intensités de courant variant entre 4 et 30 ampères, bien que les mesures sur lesquelles elle repose n'aient pas porté sur des courants supérieurs à 20,7 ampères; on peut néanmoins admettre sans difficulté cette extrapolation.

Nous avons simplifié la formule (I) de manière à lui donner une valeur pratique, en posant simplement

$$I_m = 20i + 0,4i^2. \qquad (II)$$

La suppression du terme constant est compensée par l'augmentation du coefficient du terme du second degré. La concordance des résultats de la formule simplifiée avec ceux de la formule rigoureuse est aussi grande qu'on peut le désirer. Voici par exemple, dans le tableau ci-dessous, les valeurs obtenues à l'aide de ces deux formules pour différentes valeurs de l'intensité du courant.

Valeur de I_m (en carcels) d'après la formule

i	I	II	DE TISCHENDOERFER.
4 amp.	92.7	86	37
6	139.6	134	78
8	190.0	186	125
10	242.7	240	178
12	298.8	298	237
14	358 0	358	303
16	420.2	422	375
18	484.5	490	453
20	553.8	560	537
30	941.2	900	603

Pour comparer les valeurs données par la formule de Tischendoerfer avec celles données par les formules I et II, il faut transformer les bougies en carcels; en admettant que M. Tischendoerfer ait eu en vue la bougie allemande, qui vaut approximativement 1/8 de carcel, on obtient les valeurs inscrites dans la dernière colonne du tableau. On voit que cette formule donne des résultats trop faibles pour les faibles intensités de courant.

La formule à laquelle nous sommes arrivé n'a aucune prétention d'exactitude parfaite; c'est une simple formule approximative permettant de déduire à 10 ou 20 p. 100 près l'intensité lumineuse d'un foyer à arc marchant normalement de la simple lecture d'un ampère-mètre.

Cette exactitude est bien suffisante pour les lampes à arc où les variations sont souvent si considérables.

Nous avons vu plus haut qu'on pouvait admettre sans trop d'inconvénient que l'intensité horizontale est égale à 0,2 fois l'intensité maximum. La formule de l'inclinaison permet alors de calculer l'intensité pour une inclinaison donnée, de telle sorte que le problème photométrique des lampes à arc peut être résolu complètement par une simple lecture galvanométrique.

Dans ces dernières années on a pris de plus en plus l'habitude de désigner les lampes à arc non plus par leur intensité lumineuse, mais par l'intensité du courant. Cet usage s'est répandu par suite des différences considérables qui existaient généralement entre l'intensité lumineuse nominale et l'intensité réelle. La formule précédente peut donner quelques indications utiles sur l'intensité lumineuse maximum de ces lampes et, en tenant compte de la relation $S_m = 0{,}35\ I_m$, sur l'intensité moyenne sphérique.

149. Quant à la valeur de l'équivalent mécanique de l'unité de lumière obtenue avec les lampes à arc à courant continu, la formule II permet de

la déterminer assez exactement en fonction du courant ; on obtient en effet :

$$S_m = 0{,}35 l_m = 0{,}35(20i + 0{,}4i^2).$$

L'énergie dépensée est égale à $W = Vi$; l'équivalent mécanique de la carcel est donc égal au quotient de W par S_m, c'est-à-dire :

$$\varepsilon = \frac{Vi}{7i + 0{,}14i^2} = \frac{V}{7 + 0{,}14i}.$$

Mais V est égal à 50 volts environ ; on a donc :

$$\varepsilon = \frac{50}{7 + 0{,}14i}.$$

Cette formule donne les valeurs suivantes de ε :

$i = 4$ amp.	$\varepsilon = 6{,}61$ watts.
6	6,38
10	5,95
15	5,49
20	5,10
30	4,46

Voici les valeurs données par M. Fontaine pour les éléments des régulateurs à courants continus :

INTENSITÉ DU COURANT en ampères.	INTENSITÉ LUMINEUSE MOYENNE		RENDEMENT.	
	EN BECS CARCELS.	EN BOUGIES.	WATTS PAR CARCEL.	WATTS PAR BOUGIE.
50	600	4980	4.8	0.60
30	525	3500	5.7	0.72
20	240	1990	6.0	0.75
14	175	1450	6.2	0.78
10	100	830	6.5	0.82
8	75	620	7.2	0.90
6	50	410	8.0	1.00
4	26	210	9.0	1.13

Foyers à arc alimentés par des courants alternatifs.

150. Les résultats qui précèdent ne peuvent pas s'appliquer aux lampes à arc alimentées par des courants alternatifs, car la loi de variation de l'intensité lumineuse avec l'inclinaison des rayons est complètement différente. Un simple examen de l'état physique des charbons à courants alternatifs permet de constater cette différence.

Dans l'arc voltaïque à courants continus, il existe une différence fondamentale entre le charbon positif et le charbon négatif, le premier émettant beaucoup plus de lumière que le second. Dans l'arc à courants alternatifs, cette différence n'existe pas et les deux charbons offrent absolument le même aspect, en sorte que l'émission lumineuse du charbon supérieur est la même que celle du charbon inférieur. La répartition de

l'intensité lumineuse doit être symétrique par rapport au plan horizontal passant par l'arc ; c'est d'ailleurs ce que les mesures ont constaté. En outre, en direction horizontale, c'est surtout l'arc qui émet la plus grande quantité de radiations lumineuses, les deux charbons émettant leur lumière en direction oblique ; or, on sait que le pouvoir lumineux de l'arc même est relativement faible ; il en résulte donc que l'intensité lumineuse doit avoir sa valeur minimum en direction horizontale.

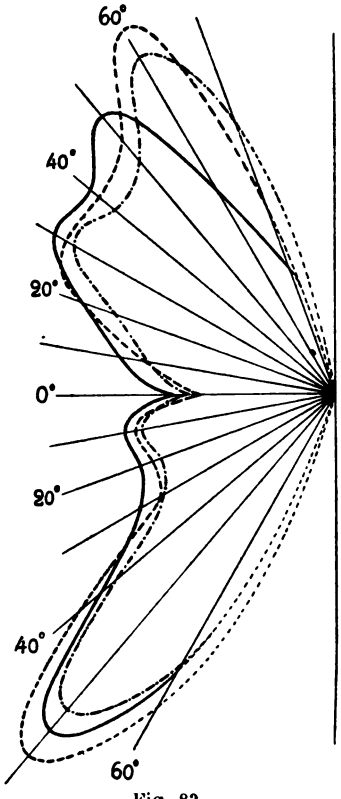


Fig. 83.

Les mesures de Fontaine, faites lors de l'introduction des lampes Gramme, avaient donné un résultat contraire aux conclusions précédentes en ce sens que l'intensité lumineuse horizontale avait une valeur à peu près égale à la valeur maximum. Ce résultat a été admis pendant longtemps, bien que contraire à la conclusion de l'examen théorique de l'émission lumineuse du foyer. Des mesures récentes de M. Uppenborn, faites avec beaucoup de soins, à l'aide de huit charbons différents, ont donné pour la courbe méridienne de la surface photométrique des courbes assez régulières, mais conformes aux conclusions précédentes. Les trois courbes de la figure 83 se rapportent à trois longueurs d'arc différentes de 2 mm., 3 mm. et 4 mm., obtenues avec une intensité de courant constante égale à 8 ampères, et avec le même charbon ; la courbe tracée en trait continu est relative à une longueur d'arc de 2 mm. ; celle en traits séparés se rapporte à un arc de 3 mm. et celle en traits séparés par des points à une longueur de 4 mm.

De ces diagrammes résulte donc la conclusion que la répartition de l'intensité lumineuse n'est pas entièrement symétrique par rapport au plan horizontal et que le minimum se produit dans une direction peu différente de l'horizontale.

Voici en outre, pour compléter ces résultats, les valeurs de l'intensité moyenne sphérique obtenue avec trois sortes (S, M, K) de charbon, étudiées pour des longueurs d'arc de 2 mm., de 3 mm. et de 4 mm.

	2 mm.	3 mm.	4 mm.
S	180	188	331
M	210	265	264
K	292	290	280

Ces chiffres montrent donc que la longueur d'arc la plus favorable peut varier considérablement avec l'espèce de charbon employée.

Voici d'après M. Fontaine quelques données relatives aux foyers à arc à courants alternatifs.

Lampes à arc à courants alternatifs.

INTENSITÉ DU COURANT en ampères.	INTENSITÉ LUMINEUSE MOYENNE		RENDEMENT.	
	EN BECS CARCELS.	EN BOUGIES.	WATTS PAR CARCEL.	WATTS PAR BOUGIE.
35	175	1450	9.0	1.13
20	110	910	10.8	1.35
12	46	380	14.4	1.80

151. Quant à la répartition de l'intensité lumineuse des bougies à arc, des bougies Jablochkoff entre autres, elle diffère sensiblement de celle des lampes dans lesquelles les charbons sont situés dans le même axe. Les deux crayons étant placés l'un à côté de l'autre, l'intensité varie beaucoup avec l'azimut, abstraction faite des variations avec l'inclinaison. L'intensité horizontale est maximum dans la direction normale au plan des crayons, et minimum dans ce dernier. La courbe qui donne la répartition de l'intensité lumineuse dans le plan horizontal a la forme d'une lemniscate dont le petit axe correspond au plan des crayons et dont le grand axe est perpendiculaire à ce dernier.

Le rendement des bougies est un peu plus faible que celui des foyers à arc à régulateur, comme le montre le tableau suivant :

INTENSITÉ DU COURANT en ampères.	INTENSITÉ LUMINEUSE MOYENNE		RENDEMENT.	
	EN CARCELS.	EN BOUGIES.	WATTS PAR CARCEL.	WATTS PAR BOUGIE.
10	62	510	14.5	1.81
8	45	370	17.6	2.20
6	32	260	19.5	2.44
5	24	200	22.4	2.8
3	10	63	28.8	3.60

C. — Renseignements divers sur les foyers lumineux usuels

Consommation des principaux foyers lumineux.

152. Dans le chapitre consacré aux étalons photométriques, il a été

donné quelques renseignements sur l'intensité lumineuse et la dépense des foyers lumineux usuels. Ces renseignements sont suffisants pour les bougies et les lampes à huile. Il convient de les compléter pour les divers systèmes de becs de gaz et pour les lampes à pétrole les plus usuelles. Quant aux lampes au magnésium, qui donnent une lumière très intense avec une manipulation très facile, il est intéressant de reproduire leurs principaux éléments afin de faciliter la comparaison avec les autres foyers lumineux.

Voici les résultats obtenus par M. Heim (1) au laboratoire de l'Ecole polytechnique de Hanovre, à la suite d'une étude approfondie des principaux foyers lumineux. A l'aide de ces résultats, il est facile de déduire le prix de revient de la carcel-heure obtenue à l'aide de l'un ou l'autre des foyers cités : il suffit pour cela de connaître le prix du gramme du combustible employé.

Lampes à pétrole.

DÉSIGNATION.	DIAMÈTRE DU BEC en millim.	INCLINAISON sur L'HORIZONTALE.	INTENSITÉ LUMINEUSE en boug. allem.	CONSOMMATION DE PÉTROLE par heure en grammes.	CONSOMMATION DE PÉTROLE par heure et par bougie en grammes.
Bec Argand ordinaire à mèche ronde.....	25	0°	16.1	54.2	3.37
		45°	12.3	53.6	4.36
Bec rond à disque central, petit modèle.....	30	0°	19.2	63.4	5.30
		45°	11.1	61.1	5.51
Bec rond à disque central, grand modèle.....	62	0°	67.3	229.0	3.40
		45°	33.9	228.0	6.72
Brûleur Kosmos.....	30	0°	22.9	84.9	3.70
		45°	17.8	85.5	4.80

(1) *Lumière électrique*, vol. XXVI, p. 219.

Lampes au magnésium (1).

NOMBRE DE RUBANS de magnésium.	INTENSITÉ LUMINEUSE EN BOUGIES ALLEMANDES. Sans réflecteur.	Avec réflecteur.	SANS RÉFLECTEUR. Intensité lumineuse par ruban.	Consommation de magnésium par heure et par ruban en grammes.	Quantité de magnésium par heure et par 100 boug. en grammes.
1	150	3200	150	16.7	11.14
2	237	5880	118.7	16.7	14.10
4	450	8000	112.5	16.7	14.80
6	700	11300	117	16.7	14.15
8	950	17000	119	16.7	14.03

Brûleurs à gaz.

DÉSIGNATION.	INCLINAISON sur L'HORIZONTALE en degrés.	INTENSITÉ LUMINEUSE en boug. allem.	CONSOMMATION DE GAZ par heure en m³.	DE GAZ par heure et par bougie en litres.
Bec papillon	0	16.9	0.251	14.8
—	45	17.2	0.256	14.9
Bec Argand.....	0	21.9	0.239	10.9
—	45	19.4	0.241	12.4
Brûleur Auer à incandescence...	0	14.4	0.095	9.60
— — ...	45	10.5	0.104	9.88
Bec intensif Siemens à régén....	0	65.3	0.460	7.05
— —	45	46.9	0.456	9.75
— —	0	222	1.621	7.30
— —	30	162	1.614	9.96
— —	45	132	1.604	12.2
Bec Wenham.....	0	28.4	0.249	8.77
—	45	44.5	0.257	5.77
—	90	45.8	0.256	5.58
—	0	99	0.685	6.92
—	25	152	0.686	4.51
—	45	170	0.677	3.98
—	65	200	0.685	3.42
—	90	202	0.671	3.33

153. Les mesures de MM. Baille et Féry (2) sont aussi très intéressantes. Ces physiciens ont déterminé le prix de l'unité de lumière fournie par les appareils d'éclairage usuels; ils ont adopté la carcel-heure comme

(1) Ces lampes au magnésium brûlent des rubans de magnésium de 2,5 mm. de largeur sur 0,13 mm. d'épaisseur. Les variations de l'intensité lumineuse sont assez considérables. Le réflecteur de ces lampes augmente considérablement l'intensité lumineuse dans la direction désirée.

(2) *L'Electricien*, 1889.

unité. Les résultats suivants résultent des mesures directes de l'intensité lumineuse et de la consommation de combustible ou d'énergie. Le prix de revient est intéressant à consulter au point de vue relatif, mais il faut le calculer de nouveau en se plaçant dans les conditions réelles de la consommation, car il a été déterminé à l'aide des prix cotés à Paris pour les combustibles employés.

DÉSIGNATION DU FOYER LUMINEUX.	INTENSITÉ EN CARCELS.	RÉGIME.	PRIX DE LA CARCEL-HEURE au détail.	OBSERVATIONS.
Bougies.		gram. par heure.	centimes.	
1. Bougie de paraffine.....	0.14	8	18.5	Flamme jaunâtre.
2. Bougie à trous...	0.14	10	17.1	
3. Bougie de l'Etoile.....	0.14	9	12.0	
4. Bougie pleine ordinaire.....	0.15	9	12.0	
Huile.				
5. Lampe modérateur.....	1.04	36	5.6	Courant d'air double; huile de colza épurée et filtrée.
6. Lampe modérateur ordinaire.	1.06	42	6.5	Huile de colza épurée et filtrée.
7. —	0.94	46	6.8	Huile ordinaire.
8. Lampe Carcel étalon.....	1.00	42	9.6	
Pétrole.				
9. Lampe à mèche plate.....	0.81	20	2.2	Mèche de 13 mm.
10. — —	2.13	62	2.6	— 50 —
11. — à deux mèches plates.	2.07	63	2.7	— 25 —
12. — américaine s. verre...	1.82	52	2.5	
13. — à bec rond.....	1.06	28	2.4	Diam. du bec 23 mm., bec ordinaire, verre étrangl.
14. — —	1.49	51	3.0	Diam. du bec 25 mm., bec à champignon.
15. — —	0.94	30	2.9	Diam. du bec 19 mm., bec à calotte, verre coudé.
Gaz.		litres par heure.		
16. Bec papillon ordinaire.....	0.64	132	6.1	
17. — Bengel.....	1.10	134	3.6	Haut. de la flamme 6,5 mm.
18. — à toile de zircone.....	1.39	62	1.3	Beaucoup de radiat. vertes.
19. — — de magnésie.....	1.61	191	3.5	— bleues.
20. — à l'albo-carbon.....	3.35	135	?	
Lampes à incandescence.		watts par heure.		
21. Lampe Edison	0.65	29.44	6.8	Au-dessous du rég. norm.
22. — Gérard	0.72	36.74	7.5	—

Les questions de rendement sont très complexes, il faut bien préciser si le prix de revient de la carcel-heure s'applique à l'intensité mesurée dans une seule direction ou si elle se rapporte à l'intensité moyenne sphé-

rique. Pour les lampes à incandescence et à arc, et pour les becs de gaz papillon, ainsi que pour les lampes à mèche plate, les différences peuvent être très considérables.

Éclat des foyers lumineux.

154. Il n'a pas été encore question de l'éclat des foyers lumineux. D'après sa définition, l'éclat d'un foyer dont l'intensité lumineuse est uniforme est égal au quotient de la quantité totale de lumière émise par la surface de la partie éclairante du foyer, on a donc :

$$e = \frac{Q}{S}.$$

L'éclat a les mêmes dimensions que l'intensité d'éclairement.

Deux foyers de même intensité lumineuse, une lampe à incandescence et une lampe carcel par exemple, sont loin d'avoir le même éclat. La quantité de lumière que donne la première est émise par la surface restreinte S' du filament, tandis que celle de la seconde est émise par la surface beaucoup plus considérable S'' de la flamme de la lampe carcel.

On a donc :

$$e' = \frac{Q}{S'}$$

et

$$e'' = \frac{Q}{S''}.$$

La détermination de l'éclat d'un foyer lumineux exige la mesure simultanée de la quantité de lumière émise et de l'aire de la surface éclairante. Dans ses études sur l'éclairage des phares, Allard est le premier qui ait étudié cet élément. Il a déterminé l'éclat des lampes à huile de une à six mèches employées dans le service des phares et il a obtenu les valeurs suivantes exprimées en carcel par centimètre carré de flamme.

Nombre de mèches.....	1	2	3	4	5	6
Éclat.....	0,197	0,288	0,360	0,415	0,460	0,493

Ces résultats permirent à Allard de déterminer l'éclat du soleil de la manière suivante.

L'intensité d'une lampe à arc étant de 200 bougies, il considéra ce foyer lumineux comme ayant la surface d'une sphère de 1 centimètre de diamètre. La surface de cette sphère étant de 0,7854 cm.², il en résulta que la clarté de la lampe arc était de 255 carcels, c'est-à-dire 500 fois plus élevée que celle de la flamme de la lampe à six mèches. Or Bouguer a trouvé que le soleil à midi, par un jour très clair, était 11,664 fois aussi brillant qu'une bougie à la distance de 16 pouces; ce résultat correspond à une intensité lumineuse de 62,280 fois aussi grande que celle d'une bougie à 1 mètre de distance. Wollaston ayant trouvé 59,850, Allard admit le chiffre moyen de 8,200 carcels comme produisant à 1 mètre de distance

un éclairement égal à celui du soleil : dans ce nombre il est tenu compte de l'absorption atmosphérique.

Considérons, à la distance d'un mètre, une sphère apparaissant sous un angle visuel de trente-deux minutes, égal à celui du soleil ; la surface apparente de cette sphère est égale à 0,6085 cm², et pour qu'elle soit aussi brillante que celle du soleil, elle doit avoir un éclat de 12050 carcels. L'éclat du soleil est donc 47 fois aussi grand que celui de l'arc voltaïque et 25,000 fois aussi grand que celui de la lampe à huile à six mèches.

Voici les résultats obtenus par Voit lors des mesures photométriques de l'Exposition de Munich.

	Éclat (en bougies par cm²).
Bec-bougie Giroud	0,06
Bec Argand	0,30
Petit brûleur intensif Siemens à régénération	0,38
Grand — —	0,60
Lampes à incandescence	40,00
— à arc	484,00

Le nombre relatif à la lampe à arc ne concorde pas avec celui d'Allard ; la lampe étudiée par celui-ci était sans doute une lampe d'une plus grande intensité et dont les charbons étaient portés ainsi à une plus haute température.

Terminons cette étude sommaire de l'éclat des foyers lumineux par les considérations suivantes qui sont d'un réel intérêt non seulement pour l'étude de l'éclat des foyers lumineux mais aussi pour celle de l'éclairement en général.

Unité d'éclat.

155. Il y a une différence fondamentale entre l'étalon photométrique au platine et la bougie ; le premier donne l'intensité lumineuse représentée par la quantité de lumière qui sort par l'ouverture d'un centimètre carré, percée dans le diaphragme du bain de platine, et en même temps l'unité de clarté représentée par celle du platine fondu. La bougie ne donne que l'unité d'intensité, et l'unité de clarté qui doit en être déduite est en général totalement différente de la clarté réelle de la flamme. Ainsi, la surface d'une section principale de la lampe Hefner a 2,27 cm.² environ. La clarté moyenne de la flamme est donc 2,27 fois plus petite que celle qu'elle représente ; pour avoir une idée de cette unité de clarté, il faut se représenter la flamme conservant la même intensité lumineuse et réduite à une section 2,27 fois plus petite.

On passe par tous les degrés de l'échelle, depuis la clarté d'une surface éclairée à la limite de visibilité jusqu'à celle du disque solaire ; ces deux éclairements sont entre eux comme 1 à 10^6. Entre les deux se trouvent tous les éclairements possibles ; mais leur mensuration est encore dans l'enfance ; les photographes par exemple ne peuvent pas encore expri-

mer par un nombre la clarté des objets qu'ils photographient; ils estiment simplement la durée de l'exposition.

Pour exprimer par des chiffres tous les éclairements possibles, il faut des nombres très grands ou très petits, suivant l'unité adoptée. Si l'on prend pour unité, par exemple, la clarté déduite de la flamme de la lampe Hefner, la clarté du platine fondant sera exprimée par le nombre 20, celle du disque solaire par 160,000, celle de la flamme d'une bougie par 0,4, du ciel par 0,1 à 1, celle d'un papier blanc sur lequel on peut lire par 0,0006 et celle d'une surface blanche à la limite de visibilité par une fraction encore plus faible.

Voici les valeurs de divers éclats types, déterminés, pour les radiations rouges ($\lambda = 0,6306\ \mu$) et pour les radiations vertes ($\lambda = 0,5415\ \mu$), par M. L. Weber.

	$\lambda = 0,6306\mu$	$\lambda = 0,5415\mu$
I. Clarté de l'étalon absolu au platine.....	1	1
II. Clarté de la flamme Hefner concentrée à une surface de 1 cm².....	0,0635	0,049
III. Clarté d'une surface plane absolument blanche éclairée normalement à 1 m. par l'étalon au platine.....	0,0000318	0,0000318
IV. Clarté d'une surface plane et blanche éclairée normalement à 1 m. par l'étalon Hefner.....	0,00000202	0,00000516

	I.	IV.
1. Disque solaire en dehors de l'atmosphère.....	8417 4092	5 394 000 000 2 025 000 000
2. Ciel dans le voisinage du disque solaire.....	env. 1 env. 1	640 900 494 800
3. Brûleur plat carburé vu par la tranche.....	0,509 0,615	326 200 304 500
4. Carton blanc horizont. éclairé par un beau jour midi.....	0,295 0,138	189 100 68 310
5. Carton blanc éclairé normalement par le soleil à 60° de hauteur.....	0,144 0,069	92 410 34 200
6. Nuage blanc éclairé par le soleil.....	0,089 0,021	57 040 10 390
7. Brûleur plat à gaz carburé vu de champ.....	0,073 0,088	46 790 43 680
8. Brûleur Argand.....	0,044 0,057	28 150 28 150
9. Ciel clair, soleil à 60° et 90° d'azimut.....	0,05 0,008	33 000 3 800
10. Carton blanc horizont., par un jour d'hiver sombre.	0,0030 0,0010	1 945 508
11. Velours noir, éclairé par un beau jour d'été comme le n° 4.....	0,00059 0,00028	378 137
12. Carton blanc sur lequel on peut lire sans difficulté.....	0,000020 0,000015	10 10

Le tableau précédent donne l'éclat d'un certain nombre d'objets bien caractérisés; cet éclat est exprimé en fonction des unités d'éclat I et IV.

La première valeur se rapporte aux radiations rouges, la seconde aux radiations vertes.

Équivalent mécanique de la lumière.

156. Le mouvement vibratoire de l'éther produit par un foyer lumineux, mouvement qui se traduit sur la rétine par une sensation lumineuse, exige pour son entretien une dépense d'énergie qu'il est facile de calculer. Le foyer lumineux joue le rôle d'un simple transformateur d'énergie. Dans les foyers à combustion, par exemple, l'énergie est empruntée au combustible, résine, huile ou gaz ; dans les foyers électriques, elle est fournie par le courant. Or toute transformation d'énergie est accompagnée de pertes ; le foyer lumineux ne saurait manquer d'obéir à cette règle générale, les pertes étant d'autant plus considérables que le mode de transformation employé est plus imparfait. Tout foyer lumineux a donc un rendement mécanique déterminé qui indique quelle est la fraction de l'énergie totale dépensée qui est transformée en mouvement vibratoire de l'éther, capable de produire une impression lumineuse.

Ce rendement mécanique est facile à calculer. Voici, par exemple, les détails du calcul pour une lampe à pétrole et un bec de gaz.

D'après les mesures de M. Heim, à Hanovre, une lampe à pétrole ordinaire, à bec rond de $0^{mm},25$ de diamètre, donnant une intensité lumineuse de 16 bougies, consomme $3^{gr},37$ de pétrole par heure et par bougie. En admettant que la chaleur de combustion du pétrole est de 11 000 calories par kilogramme, la lampe consomme donc l'équivalent de 37 calories par heure et par bougie. Or une calorie correspond à un travail de 41 700 megergs. Le travail absorbé par la lampe est donc de

$$37 \times 41\,700 = 1\,542\,900 \text{ megergs.}$$

ce qui correspond à une puissance de

$$1\,542\,900 : 3600 = 428,6 \text{ megergs}$$

par seconde, ou $42^{watts},86$. Tel est l'équivalent mécanique de l'intensité lumineuse égale à une bougie, obtenue à l'aide d'une lampe à pétrole ordinaire. Le rendement augmente, c'est-à-dire l'équivalent diminue, si l'on emploie des brûleurs perfectionnés de grande intensité.

Pour calculer l'équivalent mécanique de la lumière du gaz, partons également des résultats obtenus par M. Heim qui a trouvé qu'un bec Argand de 22 bougies consommait 11 litres de gaz par heure et par bougie. La chaleur de combustion du gaz est de 5400 calories environ par mètre cube ; la dépense de gaz correspond donc à $59^{cal},4$ par heure et par bougie, soit à un travail de 2 476 980 megergs, produit par une puissance de $68^{watts},8$. L'équivalent mécanique d'une flamme de gaz est

donc de 68watts,8 par bougie; il est également plus faible pour les brûleurs intensifs.

Quant à l'équivalent mécanique de la lampe à incandescence, il est de 3watts,5 par bougie, en moyenne. L'équivalent mécanique de la lampe à arc est plus faible; il s'élève à environ 0watts,8 par bougie.

La différence considérable entre le rendement des deux premiers foyers et celui de la lampe à incandescence provient des pertes énormes subies dans la combustion. L'émission lumineuse de ces foyers provient de l'incandescence du charbon; dans les premiers, les particules lumineuses sont des particules de charbon non encore brûlées et dont l'incandescence est maintenue par la combustion des gaz. Il y a donc une perte par suite d'une combustion plus ou moins incomplète et surtout par convection de chaleur produite par l'air ambiant. Dans la lampe à incandescence, le filament est maintenu incandescent par le courant électrique, et, comme il est plongé dans le vide, la perte par convection est nulle et la seule perte est celle due au rayonnement.

Le tableau suivant renferme les valeurs de l'équivalent mécanique de la bougie obtenue à l'aide des foyers lumineux les plus usuels; ces valeurs n'ont rien d'absolu puisque la consommation d'un foyer diminue considérablement lorsque son intensité lumineuse augmente:

Bougie	86,0	watts.
Lampe à huile	57,0	—
— à pétrole	42,8	—
Bec de gaz papillon	93,2	—
— Argand	68,8	—
Brûleur Siemens intensif de 230 bougies	45,6	—
Lampe à incandescence de 16 bougies	3,5	—
— à arc	0,8	—

Rendement optique des foyers lumineux.

157. La production de la lumière par un foyer donné est obtenue grâce à la dépense d'une quantité d'énergie W qui est employée à produire le mouvement vibratoire de l'éther. La quantité d'énergie W rayonnée par le foyer lumineux se compose de deux parties; l'une W_1 représente l'énergie des radiations lumineuses, l'autre W_2 celle des radiations obscures. Entre ces trois quantités existe la relation

$$W = W_1 + W_2.$$

Le rapport $\frac{W_1}{W}$ de l'énergie des radiations lumineuses à celle de la totalité des radiations s'appelle le rendement optique du foyer. Ce rendement est nul lorsque la température du foyer est inférieure à 400°, puisque W_1 est alors égal à 0. Il augmente rapidement avec la température.

On peut employer deux méthodes pour mesurer ce rendement. La première consiste à faire traverser aux radiations émises par la source à étudier successivement une couche de sulfure de carbone qui laisse passer librement toutes les radiations et une couche d'épaisseur égale d'une solution d'alun qui ne laisse passer que les radiations lumineuses. On mesure dans les deux cas l'intensité de ces radiations à l'aide de la pile thermo-électrique. La seconde méthode est plus compliquée, mais elle est susceptible d'une plus grande exactitude; elle ne peut être employée que pour les lampes à incandescence. On place la lampe dans un calorimètre à parois en cuivre, minces et noircies, rempli d'eau. La totalité de l'énergie rayonnée par la lampe sous forme de chaleur est absorbée par l'eau et par les parois métalliques du calorimètre. Il suffit donc de mesurer l'élévation de température de l'eau du calorimètre pour en déduire la chaleur totale émise pendant l'unité de temps. On remplace alors le calorimètre par un pareil en verre mince; dans ce cas, les radiations obscures seulement sont absorbées par l'eau et le verre du calorimètre, tandis que les radiations lumineuses ne subissent qu'une absorption négligeable. L'élévation de température du calorimètre résulte donc uniquement de l'action des radiations obscures. Cette méthode permet d'atteindre facilement une exactitude de 0,3 pour 100.

Ces deux méthodes ont été employées par plusieurs physiciens pour déterminer le rendement optique des foyers usuels. Tyndall, le premier, a fait des recherches de cette nature. Récemment de nouvelles mesures ont été faites par M. Blattner (1) à Zurich (1885), et par MM. Merrith et Marks (2) aux États-Unis (1890).

Les mesures de Blattner et de Merrith sur le rendement des lampes à incandescence offrent un réel intérêt. La lampe à incandescence est en effet le seul foyer lumineux dont on peut faire varier à volonté la température, puisqu'il suffit pour cela d'augmenter l'intensité du courant qui chauffe le filament. On peut donc, à volonté, faire varier la nature de la lumière émise et étudier une lumière fournie par l'incandescence et passant successivement d'une coloration rouge sombre à une coloration brillante. Tous les résultats expérimentaux confirment la conclusion fournie par les déductions théoriques qui précèdent, à savoir que le rendement lumineux doit augmenter avec la température.

Cette conclusion a reçu encore une autre confirmation par les mesures de M. Nakano et de M. Marks sur le rendement lumineux de l'arc voltaïque. Ces électriciens ont trouvé que, pour un arc fonctionnant sous une différence de potentiel et une intensité de courant déterminées, le rendement umineux varie avec l'inclinaison des rayons. Ce fait s'explique très facilement par la nature même de l'arc voltaïque. Dans ce foyer, la plus grande

(1) *La Lum. électr.*, vol. XXIII, p. 519.
(2) *La Lum. électr.*, vol. XXXIII, p. 255.

partie de la lumière émise provient du charbon supérieur positif dont la température est beaucoup plus élevée que celle du charbon inférieur (négatif). Suivant la direction du rayon, la lumière émise provient surtout du charbon positif ou du charbon négatif, c'est-à-dire de solides incandescents dont la température est différente. La qualité de la lumière est donc différente suivant l'inclinaison des rayons lumineux, et par conséquent le rendement optique doit être aussi différent.

Dans le tableau suivant nous avons rassemblé les résultats les plus intéressants des mesures de rendement qui ont été faites sur les foyers lumineux; parmi les nombreuses valeurs relatives aux lampes à arc, nous avons choisi les valeurs les plus élevées obtenues avec des charbons de 6 millimètres de diamètre; les valeurs obtenues en réalité dans la pratique sont sensiblement plus faibles.

Désignation des foyers lumineux.	Rendement optique en pour 100.	Autorité.
Flamme d'hydrogène	0,0	Tyndall.
Lampe à huile	3,0	—
Brûleur à gaz ordinaire	4,0	—
Lampe Swan de 16 bougies poussée à 2,6	2,3	Blattner.
— — 9,2	2,8	—
— — 13,2	3,6	—
— — 20,6	5,2	—
Lampe Edison de 16 bougies poussée à 4,0	3,6	—
— — 8,3	4,5	—
— — 17,0	6,2	—
— — 28,6	8,5	—
Lampe Bernstein de 32 bougies poussée à 15	4,2	—
— — 30	6,5	—
— — 50	7,3	—
— — 90	9,9	—
Lampe à arc, inclinaison de 0°	8,4	Nakano.
— — 10°	12,4	—
— — 20°	17,4	—
— — 30°	18,0	—
— — 40°	18,2	—
— — 50°	19,8	—
— — 60°	5,5	—
— rendement sphérique	16,6	—
Lampe au magnésium	15,0	Nichols.
Tube de Geissler	32.7	Staub.

Ces résultats montrent que le rendement optique des foyers usuels ne dépasse pas 10 p. 100 et qu'il oscille généralement autour de 5 à 6 p. 100. En d'autres termes, dans nos foyers usuels, 95 p. 100 de l'énergie dépensée sont consacrés à produire des radiations de l'éther qui n'affectent pas notre œil, c'est-à-dire des radiations dont la longueur d'onde est supérieure à 0μ,810. Au point de vue de la production de la lumière, cette énergie est perdue.

Pour produire les vibrations de l'éther dont la longueur d'onde est

comprise entre 0μ,818 et 0μ,360, on est donc forcé de produire la totalité des vibrations dont la longueur d'onde est supérieure à 0μ,810. On se trouve donc, suivant l'heureuse comparaison de M. Lodge, dans la situation d'un organiste qui, pour tirer quelques notes aiguës de son instrument, devrait souffler dans tous les tuyaux du clavier.

La faible valeur du rendement optique des foyers usuels s'explique par le fait qu'ils sont basés sur l'incandescence du charbon et que la température de celui-ci est à peu près la même dans tous. Au point de vue physique, nous n'avons fait aucun progrès dans ce domaine depuis les débuts de la civilisation, et la torche de résine dont se sert le sauvage comme foyer lumineux est au point de vue du rendement lumineux presque aussi parfaite que les foyers à arc voltaïque qui répandent la lumière à profusion dans les grandes villes. Tout au plus est-on parvenu à obtenir un rendement moyen de 6 p. 100 au lieu de 3 ou 4 p. 100. Il y a donc de la marge pour les progrès futurs.

Jusqu'à maintenant on n'a accordé aucune attention à ce point spécial de l'éclairage artificiel. Toutes les recherches ont visé à produire l'électricité le plus économiquement possible; aucune n'a tendu à diminuer la dépense d'énergie dans le foyer par un procédé permettant de supprimer ou du moins de diminuer la production des radiations obscures sans nuire à celle des radiations lumineuses.

Un simple exemple numérique montre quels sont les procédés extravagants de notre éclairage actuel.

Admettons que la force motrice nécessaire à la production du courant électrique soit fournie par un moteur à vapeur dont le rendement ne dépasse pas 10 p. 100, dans les meilleures conditions. Le rendement de la machine dynamo-électrique étant de 90 p. 100, on voit que 9 p. 100 seulement de l'énergie accumulée dans le charbon sont transformés en énergie électrique. Si l'on admet une perte de 10 p. 100 dans les conducteurs, etc., il reste pour être dépensée dans la lampe une énergie égale à $0,09 \times 0,9 = 0,081$ de l'énergie primitive. Mais, de cette énergie dépensée dans la lampe, 90 p. 100 sont employés à la production de la chaleur; les 10 p. 100 qui restent servent seuls à la production de la lumière. Le rendement final est donc de $0,081 \times 0,1 = 0,0081$, soit de 1 p. 100 seulement. Et c'est ce résultat qu'on qualifie de brillant et de merveilleux.

Ce calcul fait donc le procès de l'éclairage électrique. Mais on s'en console facilement en songeant que le résultat est encore bien moins satisfaisant si l'on considère les autres foyers lumineux.

La lumière artificielle de l'avenir.

158. Pour améliorer le rendement optique des foyers lumineux, il faudrait donc ne produire que les vibrations de l'éther susceptibles d'affecter la

rétine, c'est-à-dire des vibrations dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0,81 et 0,360μ. La nature a résolu ce problème de la manière la plus parfaite, dans l'organe lumineux des vers luisants et autres insectes lumineux.

Cette lumière de nature spéciale a été étudiée spécialement par M. R. Dubois (1) et par M. Langley (2); leurs recherches ont porté sur la lumière émise par les pyrophores, insectes coléoptères des tropiques, dont la fonction photogénique est très développée.

La nature de cette fonction photogénique est encore peu connue; M. Dubois pense qu'elle correspond à un simple phénomène physico-chimique dont l'insecte entretiendrait l'activité et qui pourrait, par exemple, offrir quelque analogie avec celui qui transforme, dans le foie, le glycogène en sucre.

La lumière émise par les pyrophores est très remarquable; elle est composée presque uniquement de radiations vertes et jaunes et son spectre est continu, sans présenter de bandes ou de raies. Les radiations émises ont des longueurs d'onde comprises entre 0μ,450 et 0μ,650, le maximum ayant lieu pour 0μ,550.

On sait que l'œil est beaucoup plus sensible aux radiations vertes et jaunes qu'aux autres radiations du spectre. L'insecte émet donc précisément les radiations lumineuses qui correspondent à ce maximum de sensibilité. C'est encore une autre propriété avantageuse de cette lumière au point de vue photométrique.

M. Langley a déterminé pour quatre foyers lumineux différents quelle est la répartition dans les diverses régions de leur spectre d'une quantité d'énergie égale à l'unité.

Il est arrivé aux résultats suivants. Dans les lumières du gaz et de l'arc voltaïque, le maximum d'énergie a lieu pour des longueurs d'onde égales à 1μ,6 et 1μ,16, c'est-à-dire pour les longueurs d'onde qui n'affectent déjà plus la rétine. On voit que la presque totalité de l'énergie du spectre de ces deux lumières est dépensée dans l'infra-rouge. Dans la lumière solaire et celle du pyrophore, le maximum d'énergie a lieu dans la partie visible du spectre, à 0μ,62 pour la première et à 0μ,57 pour la seconde.

Cette coïncidence montre que ces deux lumières de nature si différente sont des mieux qualifiées pour l'éclairage. Mais la seconde l'est encore mieux que la première, puisque l'énergie dépensée en dehors des radiations lumineuses est tout à fait nulle, tandis que, dans la lumière solaire, l'énergie du spectre infra-rouge n'est nullement négligeable à côté de celle du spectre visible.

Si la lumière parfaite par excellence, la lumière solaire, est composée de vibrations qui sont en dehors des limites perceptibles à l'œil, c'est

(1) *Séances de la Société de physique*, 1886, p. 138.
(2) *Amer. journal of science*, vol. XL, 1890, p. 97.

qu'elle n'a pas seulement pour but de nous éclairer. L'énergie que nous envoie le soleil à l'aide du mouvement vibratoire du milieu éthéré dans lequel nous sommes plongés a aussi pour but de maintenir la température terrestre entre des limites déterminées. Dans la lumière solaire, toutes les vibrations sont utiles, tandis que dans une lumière articielle on n'a intérêt à produire que des vibrations qui affectent la rétine, et non les vibrations calorifiques ; il faut donc produire de la lumière froide.

Voici, pour terminer, un court résumé des recherches qui ont été faites en vue de la production directe de cette lumière de l'avenir.

Tous nos foyers lumineux, torche de résine, chandelle, bec de gaz, lampe à arc, sont identiques, comme nous l'avons déjà fait remarquer. L'éclat lumineux de tous ces foyers est produit par l'incandescence du charbon ; ils ne diffèrent que par la température à laquelle ces particules de charbon sont portées.

Il faudrait donc trouver un corps autre que le charbon, émettant à la même température une quantité de lumière beaucoup plus considérable, c'est-à-dire tel que les vibrations de ses molécules entretenues par la haute température à laquelle il est porté pussent imprimer à l'éther ambiant un mouvement vibratoire beaucoup plus rapide. Ce corps une fois trouvé, la question aurait fait un grand pas.

Il semble que cela n'est pas impossible. M. Nichols a trouvé, par exemple, que le magnésium incandescent émettait de la lumière dans des conditions différentes de celles du charbon. D'abord, cette lumière se rapproche beaucoup plus de celle du soleil que celle des autres foyers lumineux. A intensités lumineuses égales, la flamme du magnésium est près de dix fois plus brillante que celle du gaz dans le violet, la moitié moins dans le rouge ; elle surpasse également celle de l'arc électrique au delà du jaune. Des mesures approximatives ont permis de conclure que la flamme de magnésium a un rendement lumineux de 15 p. 100 environ, soit trois fois plus élevé que celui d'une lampe à incandescence en régime normal.

Si le corps lumineux était du carbone, l'éclat de la lumière du magnésium correspondrait à une température très supérieure à celle de l'arc voltaïque, tandis qu'il résulte des mesures directes que cette température ne dépasse guère 1400°, c'est-à-dire celle de la combustion du gaz. M. Nichols admet que la loi de radiation du magnésium diffère essentiellement de celle qui régit les cas ordinaires d'incandescence.

Les radiations lumineuses de l'oxyde de magnésium sont hors de proportion avec la température d'incandescence, les radiations à faibles longueurs d'onde étant fortement représentées. Peut-être faut-il considérer dans l'émission lumineuse du magnésium les phénomènes que E. Wiedemann désigne par le nom général de *luminescence*, ce mot s'appliquant à tous les phénomènes connus de phosphorescence, de fluorescence, etc.

On admet que la luminescence est due à une classe particulière de vibrations moléculaires distinctes de celles qui donnent l'incandescence ordinaire ; ce mode de vibrations a une tendance particulière à produire une sélection des longueurs d'onde, l'une d'elles ayant toujours une tendance à prédominer.

L'énergie depensée dans le corps luminescent a donc pour effet d'entretenir les vibrations moléculaires à période déterminée, ces vibrations produisant dans l'éther ambiant un mouvement vibratoire de même période. Le tout est de trouver ce corps de telle manière que l'entretien de l'énergie moléculaire soit facile et que la sélection des longueurs d'onde qu'il opère corresponde exactement aux vibrations de l'éther à faible longueur d'onde.

Il nous paraît qu'il y a lieu d'entreprendre des recherches dans cette direction, les phénomènes de luminescence étant nécessairement à la base de la production lumineuse des vers luisants et autres insectes lumineux.

Dans l'énumération des sources de lumière dont l'étude approfondie pourrait conduire à des résultats nouveaux importants, nous n'avons fait aucune mention des phénomènes lumineux produits directement par les décharges électriques. Parmi ces phénomènes lumineux, il faut citer en première ligne ceux qui se produisent dans les tubes d'induction de Geissler.

Le rendement optique de cette source de lumière a été mesuré dernièrement par M. Staub (1), à Zurich, à l'aide du calorimètre à glace de Bunsen. Le tube de Geissler soigneusement noirci au noir de fumée était placé dans le calorimètre à glace ; la quantité de glace fondue pendant un temps déterminé donnait la mesure de la quantité totale de chaleur produite dans le tube par les décharges électriques ; une seconde mesure effectuée avec le tube non noirci qui donnait ainsi passage aux rayons lumineux permettait de mesurer la quantité d'énergie correspondant aux radiations obscures. En procédant de cette manière, M. Staub a obtenu 32,7 p. 100 comme rendement optique du tube de Geissler. Ce rendement est le plus élevé obtenu jusqu'ici avec des sources de lumière artificielle. Malheureusement la quantité de lumière ainsi produite est trop petite pour être utilisée dans l'éclairage.

Les travaux récents de Tesla donnent une importance exceptionnelle à ce mode de production de la lumière. Il semble que cet ingénieur soit parvenu à rendre pratiques des lampes basées sur le principe des tubes de Geissler. Les décharges électriques sont obtenues à l'aide de courants alternatifs de haute tension et de très grande fréquence (20 000 alternances par seconde). On a obtenu de cette manière une intensité lumineuse assez

(1) *Beiblaetter*, vol. XIV, p. 538.

considérable. Les détails précis manquent encore sur ces nouveaux appareils et sur leur rendement.

Il reste enfin à dire deux mots d'un procédé théorique de production de la lumière, bien que ce procédé ne puisse pas conduire à des résultats pratiques. Les travaux théoriques de Maxwell ont montré que les phénomènes électriques se transmettent par des ondulations de l'éther ambiant et que ces ondulations coïncident avec les vibrations lumineuses lorsque leur longueur d'onde est suffisamment faible.

D'après cette théorie, la lumière ne serait qu'un cas particulier des ondulations électriques. Les expériences récentes de Hertz ont confirmé expérimentalement cette manière de voir et ont donné des procédés pour produire des vibrations électriques d'une longueur d'onde déterminée. Ces vibrations sont produites par les décharges d'un condensateur dans un circuit caractérisé par sa capacité C et par son induction propre L. La longueur d'onde des vibrations électriques est alors donnée par la formule

$$\lambda = 2\pi\sqrt{LC},$$

L étant exprimé en unités électro-magnétiques et C en unités lectrostatiques.

Cette formule permet de calculer les dimensions du circuit pouvant donner des ondulations dont la longueur d'onde serait $\lambda = 0\mu,6$. On trouve ainsi que le circuit doit être de dimensions telles que la moyenne géométrique de sa capacité et de son induction propre soit inférieure à $0\mu,1$. Cela revient à dire que les dimensions du circuit doivent être de l'ordre des dimensions moléculaires. La théorie électro-magnétique de la lumière conduit donc à un résultat identique au précédent. Pour obtenir la lumière artificielle froide, il faut imprimer aux molécules des vibrations dont la période est égale à celle des ondulations lumineuses, sans passer par l'intermédiaire des vibrations de période plus longue. Mais l'entretien de ces vibrations moléculaires pourra peut-être s'obtenir à l'aide des ondulations électriques produites directement.

CHAPITRE VI

RÉPARTITION ET MESURE DE L'ÉCLAIREMENT

159. Pour déterminer la valeur d'un système d'éclairage, on s'est contenté pendant longtemps de multiplier le nombre des foyers par l'intensité lumineuse de chacun d'eux, puis de diviser le nombre total d'unités lumineuses par la superficie de la surface éclairée. Il est inutile de dire que ce mode de procéder ne peut donner que des résultats fort imparfaits, car les variations de l'intensité lumineuse avec la direction des rayons sont bien différentes suivant le luminaire employé; il est par exemple inadmissible de comparer de cette manière l'éclairage au gaz avec l'éclairage électrique, à arc ou à incandescence. Les variations de l'intensité lumineuse avec la direction des rayons, qui ne sont pas comparables pour deux becs de gaz de systèmes différents, le sont encore moins pour un foyer à gaz et une lampe à arc. Ce procédé serait à peu près correct si les foyers lumineux employés émettaient la même quantité de lumière dans toutes les directions ou au moins si la loi de variation de l'intensité lumineuse avec l'inclinaison des rayons était la même.

Au point de vue pratique, ce qu'on demande à un système d'éclairage c'est que la surface à éclairer reçoive dans toute son étendue une quantité de lumière minimum par unité de surface, c'est-à-dire que son éclairement ne tombe pas au-dessous d'une limite donnée. Pour comparer, par exemple, la valeur de deux systèmes d'éclairage, il faut donc comparer les éclairements produits par chacun d'eux et étudier quelles en sont les variations; le système pour lequel l'éclairement moyen sera le plus élevé, tout en accusant les variations les plus faibles, devra être considéré comme le meilleur.

Les éléments photométriques d'un foyer lumineux étant connus, on peut théoriquement déterminer la valeur de l'éclairement en chaque point d'une surface donnée pourvu que la position et la hauteur de chaque foyer soient données; on peut même par le calcul déterminer quelle est la répartition de ces foyers qui donne l'éclairement le plus favorable. Cependant ce problème n'est pas aussi simple qu'il le paraît, car il faut tenir compte, dans la pratique, non seulement des variations plus ou moins régulières de l'intensité lumineuse avec la direction des

rayons, mais aussi des phénomènes d'absorption et de réflexion de la lumière. L'influence de la réflexion est presque insensible dans l'éclairage d'une grande surface plane, tandis qu'elle joue un rôle important dans l'éclairage des locaux fermés. L'absorption de la lumière par le milieu ambiant ne joue un rôle que dans l'éclairage public; on peut d'ailleurs en faire abstraction, car cette absorption n'a lieu d'une manière sensible qu'en cas de brouillard; or ce cas doit être considéré comme une exception aux exigences de laquelle les systèmes d'éclairage ne sauraient satisfaire.

Les calculs relatifs à la distribution de l'éclairement sur une surface sont relativement simples lorsqu'on ne considère qu'un seul foyer lumineux d'intensité uniforme, c'est-à-dire ayant le même pouvoir éclairant dans toutes les directions. Mais si l'on considère le cas général de plusieurs foyers ayant un pouvoir éclairant différant suivant la direction du rayon lumineux, l'étude de la distribution de l'éclairement est très compliquée.

Avant d'exposer les calculs relatifs à l'éclairement, il faut définir l'unité employée.

Intensité d'éclairement.

160. La quantité de lumière dq reçue par un élément de surface ds dont la normale fait un angle i avec la direction du rayon lumineux est proportionnelle au cosinus de l'angle i (loi de l'obliquité) et inversement proportionnelle à la distance d de la source. On a donc la relation

$$dq = \frac{I ds \cos i}{d^2}. \tag{3}$$

On appelle *intensité d'éclairement* en un point donné d'une surface le quotient de la quantité de lumière dq reçue par l'élément ds de cette surface par la superficie de cet élément ds. On a donc :

$$e = \frac{dq}{ds} = \frac{I. \cos i}{d^2}. \tag{4}$$

On peut aussi considérer l'intensité d'éclairement comme la quantité de lumière reçue par l'unité de surface ($ds = 1$).

La distinction entre l'intensité d'éclairement et l'éclairement, introduite par Wybauw, est très utile, car elle permet de parler de l'intensité d'éclairement en un point donné, tandis qu'on ne peut considérer que l'éclairement d'une surface; l'intensité d'éclairement est une quantité mathématiquement définie, $e = \frac{dq}{ds}$, tandis que l'éclairement est une notion physique ou même physiologique.

Il convient de préciser l'unité adoptée pour l'intensité d'éclairement.

Il faut prendre comme unité d'intensité d'éclairement ($e = 1$) l'intensité de l'éclairement produit sous l'incidence normale ($i = 90°$) par l'unité d'intensité lumineuse ($I = 1$) placée à la distance 1 ($d = 1$).

L'unité d'intensité d'éclairement est donc ramenée à l'unité d'intensité lumineuse. Si l'on adopte la lampe carcel comme étalon photométrique, l'unité d'intensité d'éclairement sera la *carcel-mètre*, c'est-à-dire l'intensité de l'éclairement produit par la lampe carcel en un point situé à un mètre de distance dans le plan horizontal passant par le milieu de la flamme. Si, au contraire, on choisit la bougie comme étalon, l'unité d'intensité d'éclairement sera la *bougie-mètre*, etc.

M. Hospitalier a proposé d'exprimer l'intensité d'éclairement en bougies par mètre carré et non en bougies-mètre, sous prétexte que l'intensité d'éclairement est inversement proportionnelle au carré de la distance, ce que l'expression bougie-mètre n'indique pas. Cette critique ne nous paraît pas fondée, car l'intensité d'éclairement en un point est indépendante de la surface considérée, puisque c'est la limite vers laquelle tend le quotient de la quantité de lumière reçue par l'élément de surface normal au rayon lumineux passant par ce point, divisée par l'aire de cet élément.

Nous adopterons donc les termes carcel-mètre, bougie-mètre, etc Rappelons cependant qu'on a proposé de donner le nom de *lux* à l'unité d'intensité d'éclairement, mais ce nom n'est pas encore sanctionné par l'usage et, en particulier, il n'a pas été adopté par le Congrès international des électriciens de 1889. On pourrait cependant l'employer, mais en l'appliquant à la *bougie décimale*, égale au dixième de l'étalon absolu au platine, et adoptée comme unité pratique d'intensité par le Congrès de 1889. Au lieu de dire une bougie-décimale-mètre, on dirait donc simplement un *lux*.

Calcul de l'éclairement d'un plan horizontal.

161. Soit I l'intensité lumineuse du foyer placé à la hauteur h au-dessus du plan horizontal qu'il s'agit d'éclairer. L'intensité de l'éclairement en un point P (fig. 84) situé à la distance x du pied du candélabre est donnée par la formule

$$e = \frac{I \sin \theta}{h^2 + x^2} \qquad (1)$$

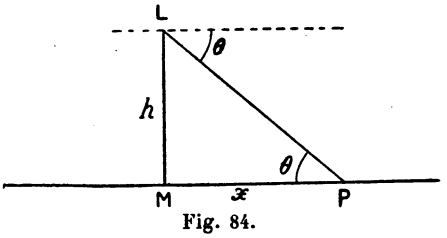


Fig. 84.

θ désignant l'angle formé avec l'horizontale par le rayon joignant le foyer au point P.

Des transformations bien simples permettent de donner à cette formule

l'une des trois formes suivantes :

$$e = \frac{I \cos^2\theta \sin\theta}{x^2} \tag{2}$$

$$e = \frac{I \sin^3\theta}{h^2} \tag{3}$$

$$e = \frac{Ih}{(h^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}. \tag{4}$$

La simple inspection de ces formules permet de tirer des conclusions très intéressantes.

La formule (3) entre autres montre que la variation de l'éclairement sur le plan horizontal, le luminaire étant à une hauteur constante, est proportionnelle à $\sin^3\theta$. Cet éclairement est donc maximum au pied du candélabre, c'est-à-dire pour $\theta = 90°$.

162. A l'aide de la formule (2), on détermine facilement la hauteur à laquelle il faut placer le foyer lumineux pour obtenir l'intensité d'éclairement maximum à la distance x; il suffit pour cela d'égaler à zéro la dérivée du second membre de cette formule ; on obtient ainsi l'équation

$$\frac{I \cos\theta}{x^2} \cdot (\cos^2\theta - 2 \sin^2\theta) = 0$$

qui donne la solution

$$\operatorname{tg}\theta = \sqrt{\frac{1}{2}}.$$

L'angle θ correspond donc à 35°16′; la hauteur h correspondante est donnée par la formule

$$h = x \operatorname{tg}\theta = \frac{x}{\sqrt{2}} = 0{,}707x. \tag{5}$$

Pour obtenir l'intensité d'éclairement maximum en un point donné situé à la distance x du pied de la verticale du foyer lumineux, il faut placer ce dernier à une hauteur égale à $0{,}707x$.

La formule (4) permet de résoudre un problème analogue : calculer le rayon x de la circonférence qui reçoit un éclairement d'intensité déterminée e, la hauteur du candélabre étant donnée ; on obtient la formule

$$x^2 = \left(\frac{Ih}{e}\right)^{\frac{2}{3}} - h^2. \tag{6}$$

On peut aussi supposer h variable et déterminer quelle est la plus grande valeur du rayon x correspondant à une intensité d'éclairement donnée e. Il suffit pour cela d'égaler à 0 la dérivée de la valeur de x^2 obtenue à l'aide de l'équation (3). On obtient ainsi pour θ la condition

$$\sin^2\theta = \frac{1}{3}; \quad \cos^2\theta = \frac{2}{3}; \quad \text{ou} \quad \operatorname{tg}\theta = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Cet angle est le même que dans le premier problème ; il est donc égal

à 35°16′ et correspond à $h = \frac{x}{\sqrt{2}}$. La distance x devient alors, en remplaçant $\sin\theta$ et $\cos\theta$ par leurs valeurs,

$$x^2 = \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{I}{e} = 0{,}385 \frac{I}{e}. \qquad (7)$$

Éclairement moyen.

163. Considérons une partie S du plan horizontal et portons comme ordonnée sur la verticale de chaque point de ce plan la valeur de l'intensité d'éclairement en ce point. Le lieu des extrémités des ordonnées est une surface qui représente exactement les variations de l'éclairement sur la surface S. Le volume compris entre cette dernière et la surface, lieu des extrémités des ordonnées, représente la quantité totale d'éclairement de S; ce volume caractéristique s'appelle le *volume d'éclairement* de la surface S (Wybauw).

La formule qui donne ce volume d'éclairement V est simplement

$$V = \int e ds,$$

e représentant l'intensité d'éclairement de l'élément ds de la surface S et l'intégration devant être effectuée sur toute l'étendue de cette dernière.

En tenant compte des dimensions de e et de ds, on reconnaît que le volume d'éclairement est une quantité de lumière; c'est donc une nouvelle expression pour désigner une chose déjà définie. A ce point de vue, on pourrait protester contre l'introduction de ce nouveau terme; mais, en tenant compte des considérations qui ont conduit à l'expression *volume d'éclairement*, on ne saurait qu'approuver cette dénomination qui remplace avantageusement l'expression *quantité de lumière* dans bien des cas.

Une surface S étant donnée ainsi que son volume d'éclairement, on peut calculer quelle doit être l'intensité d'éclairement, supposée uniforme, pour que le volume d'éclairement, limité alors par deux plans parallèles, soit égal au volume d'éclairement primitif. Cette intensité d'éclairement uniforme s'appelle l'*intensité moyenne d'éclairement* ou l'*éclairement moyen*, e_m; on a donc:

$$e_m = \frac{V}{S}.$$

L'éclairement moyen d'une surface donnée S est donc le quotient du volume d'éclairement V de cette surface par sa superficie S ou le quotient de la quantité totale de lumière qui tombe sur cette surface par sa superficie S.

Les calculs relatifs à l'éclairement moyen offrent un intérêt relativement considérable.

164. On peut par exemple calculer de la manière suivante l'éclairement moyen de l'espace circulaire de rayon x ayant son centre au pied du candélabre.

Considérons d'abord un anneau circulaire compris entre les cercles de rayons x_1 et x_2, correspondant aux rayons lumineux faisant avec le sol les angles θ_1 et θ_2 (fig. 85).

La quantité de lumière reçue par cet anneau circulaire est la même que

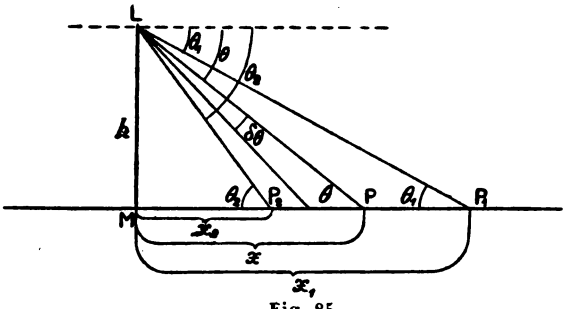


Fig. 85.

celle qui est reçue par la zone de la sphère de rayon 1 limitée par les cônes dont les cercles de l'anneau sont les bases.

Pour un anneau élémentaire correspondant à un angle $d\theta$, cette quantité de lumière est représentée par l'intensité lumineuse du foyer multipliée par la surface de la zone ayant pour base $d\theta$: elle est donc égale à $I\,2\pi\cos\theta$. La quantité totale de lumière reçue par l'anneau $\theta_1\ \theta_2$, ou son volume d'éclairement, est ainsi

$$V = \int_{\theta_1}^{\theta_2} 2\pi I \cos\theta d\theta.$$

L'éclairement moyen de l'anneau est égal à V divisé par sa superficie; or celle-ci est égale à $\pi\left[\frac{h^2}{\operatorname{tg}^2\theta_1} - \frac{h^2}{\operatorname{tg}^2\theta_2}\right]$.

L'éclairement moyen est donc

$$e_m = \frac{2}{h^2}\frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} I\cos\theta d\theta}{\left[\frac{1}{\operatorname{tg}^2\theta_1} - \frac{1}{\operatorname{tg}^2\theta_2}\right]}. \qquad (8)$$

En faisant $\theta_2 = 90°$, on obtient l'éclairement moyen du cercle de rayon x_1 ayant son centre au pied de la verticale du foyer lumineux; on a ainsi :

$$e_m = \frac{2\int_{\theta_1}^{\frac{\pi}{2}} I\cos\theta d\theta}{x_1^2}. \qquad (9)$$

Cette formule est générale. Si l'on suppose que l'intensité du foyer lumineux est la même dans toutes les directions, c'est-à-dire si I est constant, la formule devient

$$e_m = \frac{2I \int_{\theta_1}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta d\theta}{x_1^2} = \frac{2I(1-\sin\theta_1)}{x_1^2}. \qquad (10)$$

Effet utile d'éclairement.

165. Faut-il, lorsqu'on calcule l'éclairement produit par un foyer lumineux, mesurer cet éclairement sur le plan horizontal ou sur un plan normal aux rayons lumineux? La question est très controversée.

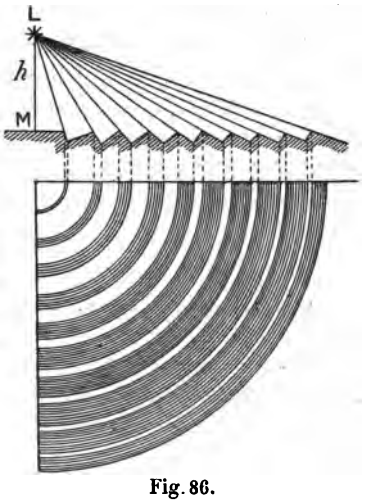


Fig. 86.

Dans les calculs qui précèdent, nous avons considéré l'éclairement sur le plan horizontal, c'est-à-dire nous avons multiplié par le sinus de l'inclinaison des rayons lumineux l'éclairement produit sur un plan normal à ces rayons. La présence de ce facteur sin θ dans les formules constitue toute la différence de ces deux méthodes.

Quelques spécialistes très compétents en matière d'éclairage, entre autres M. Weissenbruch (1), estiment que c'est l'éclairement du plan horizontal seul qui est l'élément à considérer; d'autres par contre, parmi lesquels M. Wybauw (2), sont d'avis que l'éclairement du plan normal aux rayons lumineux doit jouer le rôle principal dans la répartition de l'éclairage. « Ce n'est pas en général le plan géométrique horizontal proprement dit qui doit être éclairé, mais les objets qui se trouvent sur ce plan. Sur la voie publique ce sont les passants, les voitures, les bosses et les fosses du pavage ; et l'on peut dire en général que les corps qu'il s'agit d'éclairer présentent des faces et des formes le plus souvent différentes du plan horizontal.... Quoique nous trouvant sur un plan matériel horizontal, nous n'avons aucun motif pour considérer un élément horizontal plutôt qu'un autre, et ce qui nous intéresse bien plus et avec beaucoup plus de raison, c'est l'éclairement

(1) Comparaison de plusieurs projets d'éclairage d'un espace découvert par grands et par petits foyers; *Bull. de la Soc. belge des électr.*, 1889.

(2) Mesure et répartition de l'éclairement; *Bull. de la Soc. belge des électr.*, 1885.

maximum que peut donner le foyer au point où nous sommes, sur une face normale à la direction des rayons. »

On peut objecter à cette manière de voir de M. Wybauw que le sol horizontal a une influence prépondérante parce que tous les objets à éclairer s'y trouvent placés ou circulent sur son étendue; il règle la distance de ces divers objets au foyer lumineux en même temps que l'inclinaison du rayon lumineux par rapport à une surface quelconque qui se déplacerait d'un point à un autre du sol.

Supposons par exemple le sol formé d'anneaux concentriques perpendiculaires aux rayons lumineux et recevant chacun un maximum d'éclairement ($\theta = 90°$); il est évident que les surfaces de raccordement sont alors dans l'ombre, et le sol horizontal présente un certain nombre d'anneaux lumineux de plus en plus étroits, séparés par des anneaux sombres de plus en plus larges (fig. 86).

En admettant que l'éclairement doive être mesuré sur le plan normal au rayon lumineux, on admet implicitement qu'un rayon oblique au plan horizontal vaut autant comme *effet utile* qu'un rayon vertical, pourvu que cette obliquité ne dépasse pas une certaine limite pratique. Cette limite se confond d'ailleurs avec la limite des distances au-delà desquelles on ne tient plus compte de l'éclairement devenu trop faible.

Éclairement sur le plan horizontal et sur le plan normal.

166. On peut donc définir l'*effet utile d'éclairement* ε produit par le foyer d'intensité lumineuse I placé à la hauteur h sur un élément ds de plan horizontal situé à la distance x du foyer, par la formule

$$\varepsilon = \frac{I}{h^2 + x^2}\, ds \tag{11}$$

à laquelle on peut donner aussi l'une des formes suivantes :

$$\varepsilon = \frac{I \cos^2\theta}{x^2} \cdot ds \tag{12}$$

$$\varepsilon = \frac{I \sin^2\theta}{h^2} \cdot ds. \tag{13}$$

L'effet utile d'éclairement, introduit par M. Wybauw, étant ainsi nettement défini, on peut étudier l'importance de cette notion au point de vue pratique.

Les formules précédentes montrent que l'effet utile en un point donné du plan horizontal est à l'intensité d'éclairement en ce point comme 1 est à $\sin\theta$, c'est-à-dire

$$\frac{\varepsilon}{e} = \frac{1}{\sin\theta};$$

par conséquent l'effet utile est toujours plus grand que l'intensité d'éclairement.

Si donc on calculait l'éclairage produit par un foyer donné en se basant sur l'effet utile, on obtiendrait un résultat trop favorable. Les considérations suivantes, basées sur des expériences précises, montrent que les résultats fournis par les calculs basés sur l'intensité d'éclairement sont un peu trop faibles.

En effet, les calculs relatifs à l'intensité d'éclairement sont basés sur la loi du cosinus qui n'est pas rigoureuse et n'offre qu'une approximation bien faible dans la plupart des cas. Rappelons en outre que le plan horizontal paraît d'autant plus éclairé que son pouvoir réfléchissant est plus grand ; un plancher peint en noir paraît moins éclairé qu'un plancher blanc et les objets se détachent avec moins de netteté du premier que du second. L'éclairement obtenu sur une surface donnée sera d'autant plus avantageux que la quantité de lumière émise, après réflexion, par la surface, est grande. On a généralement admis que la loi d'émission photométrique était rigoureuse, ou du moins aussi exacte que possible. Or les dernières recherches de M. Seeliger à Munich ont prouvé que la plupart des substances employées dans les constructions ne suivent pas, même de fort loin, la loi théorique. On constate souvent des erreurs de 20 p. 100 avec des inclinaisons θ de 20 à 25 degrés. Il en résulte que les calculs d'éclairement basés sur la loi du cosinus ne peuvent pas donner des résultats rigoureusement exacts ; on est forcé de se contenter de résultats plus ou moins approximatifs.

Il nous paraît donc utile de tenir compte pratiquement des deux méthodes, celle de l'éclairement proprement dit et celle de l'effet utile. Nous envisagerons l'intensité d'éclairement déduite des lois photométriques fondamentales comme la limite inférieure d'éclairement et l'intensité d'effet utile définie par M. Wybauw comme la limite supérieure de la même quantité. Cette manière de voir est purement empirique, mais elle nous paraît assez justifiée puisqu'elle permet de tenir compte des arguments qui militent en faveur de l'un et de l'autre système.

167. On peut calculer la quantité totale d'effet utile reçue par un cercle de rayon x concentrique au pied du candélabre de la même manière que la quantité totale d'éclairement.

La quantité d'effet utile reçue par un anneau circulaire de rayon x et de largeur dx est égale à

$$\frac{2\pi I x dx}{h^2 + x^2} \quad \text{ou} \quad \frac{2\pi I \sin^2\theta}{h^2} x dx.$$

Par conséquent, la quantité totale d'effet utile reçue par le cercle de rayon x_1 correspondant à l'obliquité θ_1

$$\Sigma_{x_1} = 2\pi \int_0^{x_1} \frac{I x dx}{h^2 + x^2}$$

ou

$$\Sigma_{\theta_1} = 2\pi \int_{\frac{\pi}{2}}^{\theta_1} \frac{I \sin^2\theta}{h^2} x dx. \qquad (14)$$

En intégrant, on obtient immédiatement, en supposant I constant,

$$\Sigma_{x_1} = \pi I . \log_n . \frac{h^2 + x_1^2}{h^2}$$

ou en transformant en logarithmes vulgaires

$$\Sigma_{x_1} = 7{,}234 I \log \frac{h^2 + x_1^2}{h^2}.$$

On obtient de même :

$$\Sigma_{\theta_1} = 7{,}234 I \log [1 + \cot g^2 \theta_1].$$

Ces valeurs de Σ deviennent infiniment grandes pour $x_1 = \infty$ ou pour $\theta_1 = o$. Ce résultat était facile à prévoir, car on suppose que l'intensité d'effet utile diminue proportionnellement à x^2 tandis que la surface éclairée augmente proportionnellement à πx^2.

On est parti de ce résultat pour critiquer l'introduction de la notion de l'effet utile d'un foyer lumineux; ces critiques sont mal fondées, car M. Wybauw a réservé expressément que l'intensité d'effet utile peut être substituée à l'intensité d'éclairement jusqu'à une incidence limite seulement; c'est donc cette valeur θ_0 de l'incidence limite correspondant au rayon x_0 qu'il faut prendre comme limite supérieure de l'intégration lorsqu'on veut calculer l'effet utile total produit par un foyer.

Voici quelques valeurs particulières déduites de la formule : on a $\Sigma = 1$ pour $x = 0{,}6124\, h$, c'est-à-dire pour $\theta = 58°31'$. De même $\Sigma = \pi I$ pour $x = 1{,}3115\, h$, c'est-à-dire lorsque $\theta = 52°40'$.

Lorsque $x = h$, on a $\Sigma = 2{,}177\, I$ et pour $x = h\sqrt{3} = 1{,}73\, h$, on a le double de la valeur précédente, savoir $\Sigma = 4{,}354$. L'expression Σ_θ ou Σ_x représente un *volume d'effet utile* en admettant pour ce volume la définition correspondante de celle du volume d'éclairement; la surface limite de ce volume peut s'appeler également la *surface d'effet utile*.

On peut également définir l'*effet utile moyen* Σm, de la même manière que l'intensité moyenne d'éclairement, comme le quotient du volume d'effet utile par la surface éclairée; par conséquent, l'effet utile moyen d'un cercle de rayon x concentrique au pied du candélabre est

$$\varepsilon_m = \frac{7{,}234 I \log (1 + \cot g^2 \theta)}{\pi x^2}.$$

Introduction de l'intensité lumineuse réelle dans les calculs.

168. On a supposé dans les calculs précédents que l'intensité lumineuse du foyer considéré était uniforme. Or, cette hypothèse n'est réalisée par aucun foyer lumineux, comme on l'a vu au chapitre précédent; on peut

cependant admettre qu'elle est vraie pour quelques-uns des foyers usuels, pour les lampes à arc, à courants alternatifs, et même pour les lampes à arc à courants continus, munies d'un globe opalescent.

Cependant, avec les foyers à arc et à courants continus à feu, il est impossible d'admettre l'uniformité de l'intensité lumineuse. Les calculs faits à l'aide de cette hypothèse conduiraient à des résultats complètement erronés.

Si l'on veut calculer l'intensité de l'éclairement ou celle de l'effet utile en un point, il faut prendre la valeur de l'intensité lumineuse cor-

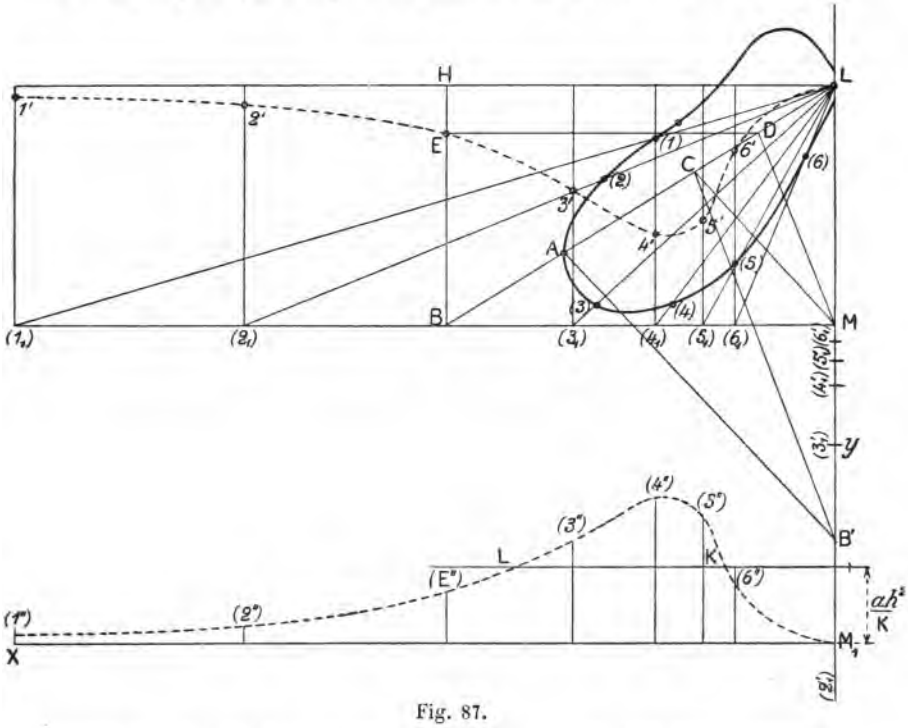


Fig. 87.

respondant à l'inclinaison sous laquelle les rayons lumineux frappant le point considéré sont émis. Ainsi, pour un point situé à une distance du pied du candélabre égale à la hauteur, il faudra prendre l'intensité maximum ($\theta = 45°$). Pour un point situé à la distance $2h$, il faudra prendre l'intensité lumineuse correspondant à $\theta = 62°$ environ, etc.

169. Connaissant la courbe méridienne de la surface photométrique du foyer lumineux, on peut déterminer par des procédés graphiques l'intensité d'éclairement en un point quelconque du plan horizontal. Voici le procédé donné par M. Loppé (1) (fig. 87).

(1) *Électricien*, 1890, p. 936.

Si l'intensité lumineuse dans la direction LA est égale à K (LA) et si (LM) représente la hauteur h, c'est-à-dire si l'on a $h = K'$ (LM), l'intensité d'éclairement au point B du plan horizontal passant par M sera :

$$e = \frac{K(LA)}{K'^2(LB)^2} \cos HBL.$$

Faisons LB′ = LB, joignons A et B′, et par M menons une parallèle à AB′, nous obtenons un point C sur LA ; joignons C à B′ et par M menons une parallèle à CB′ ; nous obtenons un point D et nous avons :

$$LC = \frac{LA - LM}{LB'} \qquad LD = LG\frac{LM}{LB'};$$

et comme LB′ = LB,

$$LD = LA\left(\frac{LM}{LB}\right)^2.$$

Si par D nous menons une horizontale jusqu'à sa rencontre en E avec la verticale de B, nous aurons :

$$HE = LD \cos HBL = LA\left(\frac{LM}{LB}\right)^2 \cos HBL.$$

Des relations précédentes résulte :

$$e = \frac{K}{K'^2(LM)^2} HE = \frac{K}{h^2} HE.$$

Si nous procédons à la même construction pour les directions L(1), L (2), etc., nous obtenons une courbe 1′ 2′ E 3′, etc., dont les ordonnées, multipliées par $\frac{K}{h^2}$, donnent la quantité de lumière reçue par le plan horizontal, et dont les abscisses, multipliées par $K' = \frac{h}{(LM)}$, donnent la distance du point considéré à la projection horizontale du foyer. La construction permet donc de trouver, par la lecture d'une simple échelle, l'éclairement en un point d'un plan horizontal situé à une distance quelconque au-dessous du foyer.

Au moyen de cette courbe, rapportée en 1″ 2″ E″ 3″, etc., on peut trouver facilement les rayons des cercles sur les circonférences desquels sont situés les points du plan dont l'intensité d'éclairement est égale à une quantité donnée e_1.

En effet, portons à partir de M_1 sur M_1B' une longueur M_1I telle que l'on ait par exemple :

$$e_1 = \frac{K}{h^2} M_1I.$$

Par I menons une parallèle à l'axe des x ; cette dernière coupe la courbe

en L et K. Les points du plan situés à des distances K′ (IK) et K′ (IL) du pied du foyer recevront de ce dernier une quantité de lumière égale à e_1.

On pourra donc tracer, sur du papier-calque, les cercles correspondants à des éclairements 1, 2, 3, etc., et trouver l'éclairement produit par un nombre quelconque de foyers.

Dans le cas d'un foyer d'intensité uniforme, à chaque valeur de l'intensité d'éclairement sur le plan horizontal ne correspond qu'un seul cercle, tandis que dans le cas d'un arc à feu nu alimenté par un courant continu, à chaque intensité correspondent deux cercles.

Ce procédé graphique offre en outre le précieux avantage suivant. On a vu dans le chapitre précédent que la surface photométrique des lampes à arc et à courants continus est à peu près identique, quelle que soit l'intensité du foyer. La figure précédente peut donc servir dans tous les cas, à condition de changer chaque fois les échelles K et K′, de manière que l'in

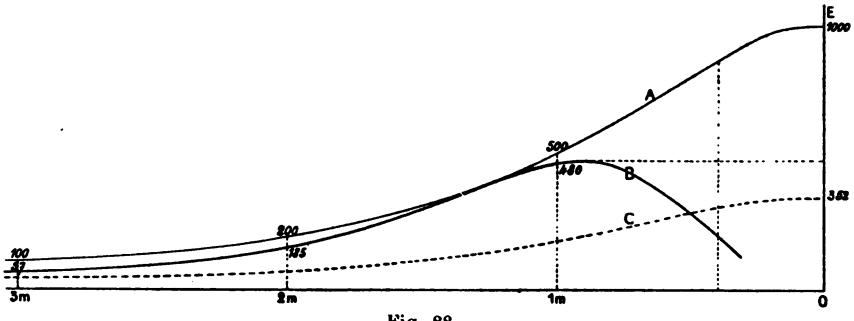


Fig. 88.

tensité lumineuse maximum soit représentée par l'expression K (LA) par exemple et la hauteur du foyer par la longueur K′ (LM). Il suffit donc de déterminer dans chaque cas particulier la valeur des coefficients K et K′.

Nous ne saurions trop insister sur la nécessité d'employer, dans les calculs relatifs à l'éclairement par les foyers à arc et à courants continus, l'intensité lumineuse réelle et non l'intensité moyenne sphérique ou l'intensité maximum. L'intensité moyenne sphérique donne des valeurs trop petites pour l'éclairement, l'intensité maximum des valeurs trop considérables.

170. Les courbes de la figure 88 représentent ces divers cas. On a porté comme abscisses les distances comptées sur le plan horizontal, la hauteur du candélabre étant supposée égale à un mètre, et comme ordonnées les intensités d'éclairement exprimées en lux (bougies décimales-mètre), en supposant : 1° l'intensité lumineuse uniforme et égale à l'intensité maximum de 1000 bougies décimales (courbe A) ; 2° l'intensité lumineuse réelle telle que la donne le diagramme de la figure 82 (courbe B) ; 3° l'in-

tensité lumineuse uniforme égale à l'intensité moyenne sphérique égale à 352 bougies décimales (courbe C).

Ces courbes permettent de tirer une conclusion importante. Au-dessous d'une certaine valeur de l'intensité d'éclairement correspondant, par exemple, à une distance égale à cinq fois la hauteur du candélabre, la diminution de l'intensité d'éclairement est très faible pour une augmentation considérable de la distance. Mais ces éclairements sont trop faibles pour qu'il y ait lieu d'en tenir compte. Dans tous les calculs d'éclairement il ne faut donc pas dépasser une certaine limite et surtout, comme le dit M. Wybauw, « éviter les calculs longs et minutieux que le but ne comporte pas ».

En se basant sur le diagramme normal de l'intensité lumineuse des

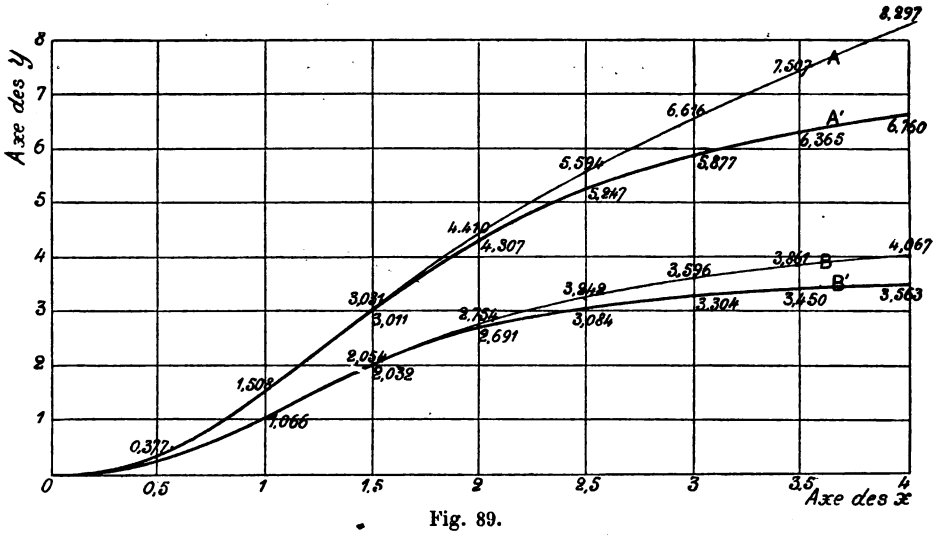


Fig. 89.

foyers à arc et à courants continus, M. Wybauw a établi un diagramme (fig. 89) qui permet de calculer facilement *la quantité de lumière reçue* (volume d'éclairement) ou *l'effet utile d'éclairement* correspondant à un cercle de rayon x dont le centre est au pied du candélabre. Dans ce cas les formules directes deviennent très compliquées et la méthode graphique seule permet de résoudre pratiquement le problème. Les deux courbes supérieures A et A' s'appliquent au calcul de l'*effet utile*, tandis que les courbes inférieures B et B' sont relatives à l'intensité d'éclairement. Les courbes A et B sont celles d'un foyer uniforme de 1000 bougies ; les courbes A' et B' celles d'une lampe à arc dont l'intensité maximum est de 1000 bougies.

L'inspection seule du graphique suffit pour en faire comprendre l'usage. Supposons, par exemple, que l'on demande le volume d'éclaire-

ment fourni sur le sol, dans un cercle de 30 mètres de rayon, par un foyer placé à la hauteur de 10 mètres et dont l'intensité maximum est de 2000 bougies. La distance étant égale à 3, on a pour l'abscisse la valeur $x = 3$; l'ordonnée correspondante y est 5,877. Donc le volume cherché est égal à $5{,}877 \times 2000 = 11{,}754$.

Si, au lieu d'une lampe électrique, on avait un foyer d'intensité uniforme de même puissance, le diagramme donnerait 13,232.

Ce chiffre n'est pas tout à fait celui qu'on obtiendrait en appliquant la formule. La raison en est que le diagramme a été tracé par M. Wybauw, en considérant comme uniforme l'éclairement dans le cercle de rayon h autour du pied du candélabre; l'intensité de cet éclairement uniforme étant égale à l'intensité au pied de l'oblique de 45°. En effet, dans la pratique, l'éclairement sur la base du cône à 45° est toujours plus que suffisant. S'agit-il de foyers d'intensité uniforme, la surabondance d'éclairement dans le cercle n'est d'aucune utilité et on n'a pas à la porter en compte; c'est un superflu inévitable, forcé. Pour les foyers électriques, la proximité, l'effet du réflecteur et de la lumière diffuse, rendent encore cet éclairement plus que satisfaisant. Cette façon de calculer est défavorable aux foyers d'intensité uniforme. Elle n'est d'ailleurs pas admise par tous les spécialistes, et l'élimination de l'éclairement surabondant dans le calcul de l'intensité moyenne d'éclairement n'est pas à recommander, comme nous le verrons d'ailleurs dans un prochain paragraphe.

Il est bien entendu que ces données ne se rapportent qu'à des foyers nus. On devra tenir compte de la perte occasionnée par les globes des foyers électriques. Elle peut être supposée de 30 p. 100, de sorte qu'un foyer de 200 carcels avec globe devient pour les calculs un foyer de 140 carcels à flamme nue. Il est à remarquer, en outre, que la répartition de la lumière autour du foyer avec globe n'est pas tout à fait semblable à celle du foyer nu. L'ellipse du diagramme devient moins allongée; la différence peut être même assez considérable, comme on l'a vu dans le chapitre précédent (§ 146).

Pour calculer le volume d'éclairement fourni par un foyer sur un terrain à limites irrégulières, on procédera en calculant d'abord le volume pour le plus grand cercle entier r décrit autour du pied du candélabre comme centre dans le terrain polygonal; puis pour la fraction $\frac{x}{360}$ de l'anneau rr', x étant l'angle au centre de la partie de cet anneau comprise dans le terrain; puis, pour le second anneau $r'r''$, etc. La valeur des anneaux entiers est donnée immédiatement par le diagramme. Chacun d'eux, en effet, a pour volume d'éclairement la différence des deux ordonnées extrêmes correspondantes aux abscisses $\frac{r}{h}$, $\frac{r'}{h}$, etc., multipliée par I, l'intensité maximum du foyer exprimée en bougies. On peut évidemment,

en rapprochant convenablement les cercles, obtenir tel degré d'exactitude que l'on veut.

Ces calculs sont fort simples et leur exactitude est suffisante pour tous les besoins de la pratique.

171. Nous ne saurions mieux terminer cette étude de la répartition de l'éclairement qu'en donnant un résumé de la solution que M. Loppé a donnée de quelques problèmes particuliers dans lesquels il suppose, il est vrai, que l'intensité lumineuse est uniforme. Les formules auxquelles il est arrivé sont, malgré cette restriction, assez intéressantes pour trouver place ici.

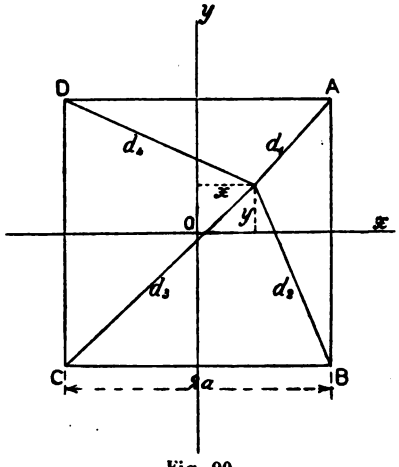


Fig. 90.

Éclairage d'une surface, les foyers étant placés aux sommets de carrés égaux.

172. Si l'on suppose quatre foyers de même intensité uniforme, placés à égale hauteur, au-dessus d'un plan horizontal, aux sommets d'un carré, on peut rechercher quel est le point du plan situé à l'intérieur du carré dont l'intensité d'éclairement est minimum.

Si ABCD sont les projections de ces foyers (fig. 90), placées à une distance $2a$ les unes des autres, en choisissant les axes coordonnés comme il est indiqué sur la figure, l'intensité totale d'éclairement e en un point est donnée par l'expression

$$e = Ih\Sigma \frac{1}{(h^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}$$

dans laquelle

$$d_1 = [(a-x)^2 + (a-y)^2]_1$$
$$d_2 = [(a-x)^2 + (a\ x\ y)^2]^{\frac{1}{2}}$$
$$d_3 = [(a+x)^2 + (a+y)^2]^{\frac{1}{2}}$$
$$d_4 = [(a+x)^2 + (a-y)^2]^{\frac{1}{2}}$$

En cherchant le maximum et le minimum de cette expression, on trouve que le point de rencontre des diagonales du carré reçoit la quantité minimum de lumière tant qu'on a :

$$h < a\sqrt{3}.$$

Ce point a au contraire un éclairement maximum quand on a :

$$h \geqq a\sqrt{3}.$$

Le premier cas, $h < a\sqrt{3}$, ou $h < 1{,}732a$, est celui qui se présente le plus ordinairement dans la pratique.

On peut également rechercher sur la ligne qui joint les projections de deux foyers le point où l'éclairement est maximum. Si $2a$ est la distance des deux foyers, on trouve que l'éclairement du point milieu de la ligne est minimum tant que l'on a :

$$h < 2a,$$

et que cet éclairement au contraire est maximum pour

$$h \geqq 2a.$$

Eclairage d'une surface donnée correspondant au minimum de dépense.

173. La solution du problème suivant conduit à des conclusions intéressantes que nous voulons énumérer. Le problème peut s'énoncer :

Éclairer un plan horizontal au moyen de foyers d'intensité uniforme, de manière que l'intensité d'éclairement en un point quelconque soit au moins égale à une quantité donnée e_0, *en employant pour cela le moins d'énergie possible.*

Il y a deux cas à considérer.

1° On a une surface à éclairer. Dans ce cas, on placera les foyers en projection aux sommets de carrés;

2° On a une rue à éclairer. Dans ce cas, le plus ordinairement les foyers sont placés en quinconce, d'un côté et de l'autre de la rue.

174. *Surface à éclairer.* — La plus grande quantité de lumière qui tombe en un point de l'intérieur de l'un des carrés provient évidemment des quatre foyers qui se projettent en ses sommets.

Si $2a$ est le côté d'un des carrés, on a vu que tant que la condition $h < 1{,}732a$ est réalisée (ce qui arrive ordinairement dans la pratique), le point qui a le minimum d'éclairement est situé à la rencontre des diagonales.

On calculera l'espacement des foyers, de sorte qu'en ce point l'intensité de l'éclairement produit par les quatre foyers soit égale à e_0, quitte ensuite, si l'influence des autres foyers n'est pas négligeable, à les espacer un peu plus.

Dans ce dernier cas, les conclusions suivantes n'en subsisteront pas moins, car la plus grande partie de la lumière provient des foyers placés aux quatre sommets.

Si h est la hauteur commune des foyers au-dessus du plan, $2a$ l'espa-

cement de ces foyers, ou le côté des carrés, I leur intensité lumineuse uniforme, on a pour l'intensité d'éclairement à l'intersection des diagonales la formule

$$e_0 = \frac{4Ih}{(h^2 + 2a^2)^{\frac{2}{3}}}. \tag{15}$$

Cette formule permet de résoudre le problème suivant.

175. La hauteur des foyers au-dessus du plan h étant donnée, choisir l'intensité lumineuse I de manière que l'énergie à dépenser soit minimum.

Le nombre N des foyers nécessaires pour éclairer une surface S étant

$$N = \frac{S}{4a^2},$$

la dépense en watts est donnée par la formule

$$D = \frac{B.I.S}{4a^2}.$$

Dans le cas de foyers à arc d'intensité moyenne, B peut être regardé comme une constante; dans le cas de foyers de grande intensité, B est une fonction de I.

Pour résoudre le problème dans le cas où B est constant, il suffit de chercher le minimum de $\frac{I}{4a^2}$; on obtient ainsi :

$$I = \frac{(3)^{\frac{3}{2}} h^3 e_0}{4h} = 1{,}30 e_0 h^2. \tag{16}$$

On prend pour I la valeur pratique se rapprochant le plus de la valeur trouvée, et on tire $2a$ de l'équation (15). On augmentera au besoin un peu la distance entre les foyers si l'influence des autres foyers n'est pas négligeable. Si, après avoir calculé I et $2a$, on trouvait que la condition $h < 1{,}732a$ n'est pas remplie, il faudrait vérifier si l'éclairement aux divers points atteint la valeur donnée e_0, car dans ce cas on sait que l'éclairement dû aux quatre foyers est maximum au point de rencontre des diagonales.

176. La même formule donne aussi la solution de la question suivante.

On donne I et l'on cherche h, de manière que l'énergie à dépenser, c'est-à-dire le nombre des foyers à employer, soit minimum.

Le nombre des foyers est donné par la relation

$$N = \frac{S}{4a^2}.$$

De (15) nous tirons :

$$2a^2 = Bh^{\frac{2}{3}} - h^2 \quad \text{en faisant} \quad \left(\frac{4I}{e_0}\right)^{\frac{2}{3}} = B.$$

$$N = \frac{S}{2(Bh^{\frac{2}{3}} - h^2)}.$$

Le minimum de N correspond au maximum de

$$Bh^{\frac{2}{3}} - h^2.$$

En prenant la dérivée et en l'égalant à zéro, on obtient :

$$h = \left(\frac{1}{3}\right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{4I}{e_0}\right)^{\frac{1}{2}} = 0{,}877 \sqrt{\frac{I}{e_0}}.$$

Si, après avoir calculé a par la relation (16), on trouvait $h \geqq 1{,}732a$, on procéderait aux vérifications indiquées ci-dessus.

177. *Une rue à éclairer.* — Les foyers (fig. 91) sont placés en ABC, les points D et E situés sur la perpendiculaire au milieu de AB reçoivent de A et B le minimum de lumière, si $h < 2a$. Soit $AD = a$ comme précédemment, écrivons la condition fondamentale

$$e_0 = \frac{2Ih}{(h^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}. \qquad (17)$$

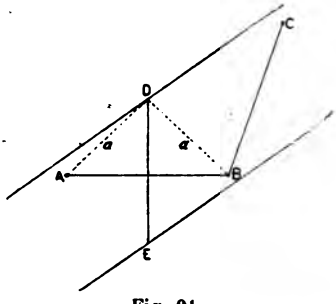


Fig. 91.

On peut alors résoudre les mêmes problèmes que dans le cas d'une surface à éclairer, par exemple.

Étant donné h, déterminer I de manière que l'énergie à dépenser soit minimum.

Le nombre des foyers est inversement proportionnel à a; la dépense en watts sera proportionnelle à $\frac{BI}{a}$ ou à $\frac{I}{a}$. Dans le cas où B est constant, on tire de (17) la valeur

$$a = (C^{\frac{2}{3}} I^{\frac{2}{3}} - h^2)^{\frac{1}{2}}. \quad \text{en posant} \quad \frac{2h}{e_0} = C.$$

On doit donc rendre minimum l'expression

$$\frac{I}{(C^{\frac{2}{3}} I^{\frac{2}{3}} - h^2)^{\frac{1}{2}}};$$

ce qui donne :

$$I = \frac{\left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{3}{2}} h^3 . e_0}{2h} = 0{,}92 e_0 h^2. \qquad (18)$$

On prend pour I la valeur pratique se rapprochant le plus de la valeur calculée et on déduit a de la relation (17). Dans le cas où l'influence des foyers plus éloignés ne serait pas négligeable, on augmenterait légèrement a

178. Pour résoudre le deuxième problème, on donne I et on cherche h.

On remarque que le nombre des foyers est inversement proportionnel à a; pour avoir le minimum d'énergie à dépenser, il faut donc rendre a ou a^2 maximum.

De (17) on tire:

$$a^2 = D^{\frac{2}{3}} h^{\frac{2}{3}} - h^2, \quad \text{en posant} \quad D = \frac{2I}{h}.$$

En égalant à 0 la dérivée par rapport à h, on obtient:

$$h = \left(\frac{1}{3}\right)^{\frac{3}{4}} \sqrt{2} \sqrt{\frac{I}{e_0}} = 0{,}62 \sqrt{\frac{I}{e_0}}. \tag{19}$$

Renseignements pratiques.

179. Les calculs photométriques relatifs à l'éclairage des espaces découverts permettent de résoudre un nombre considérable de problèmes particuliers. Nous en avons étudié un nombre suffisamment grand pour montrer comment il faut procéder dans chaque cas spécial.

Il reste à comparer les résultats des formules précédentes avec ceux fournis par la pratique.

La hauteur des candélabres est un élément important dans tout système d'éclairage. La distance des deux foyers étant égale à $2a$, l'éclairement fourni à la distance a du foyer est maximum lorsque la hauteur du candélabre est donnée par la formule

$$h = \frac{a}{\sqrt{2}} = 0{,}707a.$$

Cette hauteur est rarement adoptée en réalité. Avec des foyers distants de 100 mètres, on devrait avoir des candélabres de 35 mètres de hauteur. Les considérations esthétiques relatives à la décoration des rues empêchent l'adoption de candélabres aussi élevés. Dans certaines villes des États-Unis où ces considérations n'ont pas autant de valeur qu'en Europe, on emploie fréquemment des foyers très puissants installés au sommet de tourelles en treillis de 30 à 40 mètres de hauteur et même davantage. En Europe, la hauteur des candélabres est généralement comprise entre 6 et 15 mètres.

Il faut distinguer au point de vue de la disposition des foyers entre l'éclairage des rues et l'éclairage des espaces découverts.

Éclairage des rues.

180. On peut placer les candélabres de deux manières; ou en quinconce des deux côtés de la rue, sur les bords du trottoir, ou en ligne au milieu de la chaussée. La première disposition est adoptée dans l'éclai-

rage au gaz; la seconde est celle qui a été adoptée pour l'éclairage des grands boulevards à Paris.

Voici d'abord quelques renseignements sur l'intensité de l'*éclairement moyen* par le gaz, des principales rues de Paris en 1889 :

Rue Royale	1,6 lux.
Rue de la Paix	1,5 —
Place de l'Opéra	0,7 —
Avenue de l'Opéra	0,43 —
Rue du Quatre-Septembre	0,43 —
Tout Paris	0,05 —

En utilisant les foyers à arc voltaïque, l'éclairage en ligne au milieu de la chaussée est le plus rationnel. L'autre système d'éclairage aux bords du trottoir n'est admissible qu'avec des lampes dont l'intensité lumineuse ne dépasse pas une centaine de bougies.

L'intensité d'éclairement à la distance x du pied du candélabre se déduit de la formule

$$e = \frac{Ih}{(h^2 + x^1)^{\frac{3}{2}}}.$$

La hauteur h étant donnée ainsi que la valeur de l'intensité d'éclairement au-dessous de laquelle on ne doit pas descendre, il est facile de calculer la distance des candélabres. On obtient ainsi le tableau suivant qui donne les distances de deux candélabres de hauteurs de 6, 10 et 14 mètres et d'intensités uniformes différentes correspondant à différents minima de l'intensité d'éclairement.

Distance de deux candélabres en mètres.

MAXIMUM de l'intensité d'éclairement horizontal en lux.	I = 500 boug. déc.			I = 600 boug. déc.			I = 700 boug. déc.			I = 800 boug. déc.			I = 900 boug. déc.			I = 1000 boug. déc.		
	h			h			h			h			h			h		
	6	10	14	6	10	14	6	10	14	6	10	14	6	10	14	6	10	14
0,5	44	50	54	47	54	58	50	57	62	52	60	67	54	64	68	56	65	71
1	34	38	39	37	41	43	39	44	46	41	46	49	43	48	52	44	50	54
2	26	28	26	28	30	30	30	33	32	32	35	35	31	36	37	34	38	39

Éclairage des places et grands espaces découverts.

181. Si, pour les rues et surtout pour les rues étroites, les foyers de faible intensité sont supérieurs aux grands foyers, il n'en est pas de

même pour l'éclairage des places publiques et des grands espaces découverts. Dans le premier cas, la réflexion de la lumière sur les façades des maisons augmente beaucoup l'éclairement dans le voisinage de chaque foyer; le contraste peut être assez fort pour que les parties situées au milieu d'un intervalle paraissent être dans l'obscurité. Dans le second cas, il ne peut pas être question d'action réfléchissante sur les parois verticales. Aussi convient-il d'employer des foyers intenses placés à une hauteur assez considérable.

Les foyers peuvent être disposés en quinconce ou aux sommets de carrés égaux s'il s'agit de réaliser un éclairage aussi uniforme que possible. Quant à la hauteur des candélabres, voici quelques renseignements que la pratique a sanctionnés :

	Intensité lumineuse maximum.	Hauteur du candélabre.
240 carcels.	(10 ampères).	10 m.
328 —	(13 —)	15 —
390 —	(15 —)	18 —
490 —	(18 —)	20 —

La distance de deux foyers consécutifs est déterminée d'après le minimum admis pour l'intensité d'éclairement.

Au point de vue de l'uniformité de l'éclairage d'une grande surface, il y a évidemment avantage à employer un grand nombre de petits foyers. Car il est alors plus facile de satisfaire économiquement à la condition de l'éclairement minimum. Mais, comme l'a fait remarquer M. Weissenbruch, la comparaison de deux systèmes d'éclairage de la même surface n'est pas correcte si l'on n'observe que la seule condition de l'éclairement minimum. Il faut tenir compte aussi de l'éclairement moyen.

L'intensité moyenne de l'éclairement est toujours plus considérable avec de grands qu'avec de petits foyers, car les premiers donnent un éclairement intense dans le voisinage du candélabre. En d'autres termes, les grands foyers produisent toujours de l'éclairement surabondant (1) dans le voisinage du foyer lumineux. Faut-il compter cet éclairement surabondant dans le calcul de l'intensité moyenne ou faut-il admettre pour l'intensité d'éclairement du cercle concentrique au candélabre la valeur correspondant au rayon lumineux à 45 degrés ?

Quelques spécialistes sont partisans de la seconde alternative, entre autres M. Wybauw qui a fait la correction y relative dans les diagrammes de la figure 89. D'autres, par contre, pensent avec raison qu'on ne peut pas négliger ainsi un éclairement aussi considérable. Les parties surabondamment éclairées ne présentent que des avantages, car elles forment de véritables foyers secondaires de lumière réfléchie.

(1) *Lumière électrique*, vol. XI, p. 149, 244.

Quoi qu'il en soit, s'il s'agit de comparer deux systèmes d'éclairage, il faut faire intervenir l'intensité moyenne de l'éclairement, calculée en tenant compte de la quantité totale de lumière reçue par la surface, en lui donnant une importance au moins aussi grande qu'à celle de l'éclairement minimum.

M. Weissenbruch a démontré la nécessité d'introduire ces deux éléments, intensité moyenne et intensité minimum de l'éclairement, dans les calculs d'éclairage des gares de chemins de fer; cette conclusion s'applique également dans tous les cas où il s'agit d'avoir non-seulement un éclairement minimum, mais l'éclairement le plus intense.

Il est difficile de donner les valeurs exactes du minimum de l'intensité d'éclairement. Ces valeurs varient trop suivant les circonstances. Les chemins de fer de l'État belge admettent par exemple une intensité d'éclairement de $\frac{1}{50}$ de carcel-mètre pour l'éclairage des gares. Cette valeur est un peu trop faible, comparée surtout avec les valeurs de l'éclairement moyen des principales rues de Paris, éclairées au gaz.

Emploi des réflecteurs.

182. Avec les foyers à arc, l'intensité d'éclairement est beaucoup plus considérable que le minimum exigé; il y aurait donc avantage à diminuer la quantité de lumière reçue dans le voisinage du pied du candélabre pour la reporter à une plus grande distance. Pour y parvenir, il faut employer des réflecteurs d'une forme particulière qui rendent l'éclairement du sol horizontal sensiblement uniforme. Parmi ces appareils, la lanterne dioptrique de Trotter (1) semble résoudre le problème de la manière la plus parfaite.

M. Trotter a combiné ses réflecteurs en vue de résoudre le problème de l'éclairement uniforme du sol. On peut énoncer ce problème comme suit. Étant donné à éclairer par un seul foyer central une aire plane et circulaire, faire en sorte que si l'on divise cette aire en anneaux de même surface, chacun de ces anneaux reçoive la même quantité de lumière. Ces anneaux successifs ont des rayons qui croissent proportionnellement à $\sqrt{1}$, $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$, etc.

Il suffit pour cela que les rayons émanant du foyer lumineux et faisant entre eux des angles égaux soient dirigés de façon que les tangentes de leurs nouvelles inclinaisons avec la verticale croissent comme $\sqrt{1}$, $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$, etc.

M. Trotter obtient ce résultat, au moins d'une manière approximative,

(1) *Lumière électr.*, vol. XIV, p. 98.

à l'aide d'une lanterne hexagonale dont les faces sont formées par des lames de verre munies de stries; la forme de ces stries est déterminée rigoureusement par ce qui précède et leur section peut être obtenue graphiquement.

Les résultats obtenus à l'aide de cet appareil sont très satisfaisants; M. Preece qui l'a essayé en dit le plus grand bien. L'intensité d'éclairement est augmentée à une certaine distance du foyer, mais diminuée dans une plus forte proportion vers le pied du candélabre.

Malheureusement la taille des verres de cet appareil est très compliquée, ce qui en augmente beaucoup le prix. Aussi son emploi ne s'est pas généralisé.

On a cependant très souvent recours à des réflecteurs, mais sans en déterminer exactement la forme. On les choisit unis ou striés, généralement en tôle émaillée, de couleur blanche. Mais ces appareils n'ont pas d'autre but que de rejeter vers le sol les rayons lumineux dirigés vers le haut et qui seraient ainsi pratiquement inutilisés.

A l'instar de M. Jaspar à l'Exposition d'Électricité de 1881, on peut aussi faire usage de disques blancs assez larges qu'on place horizontalement au-dessus de la lampe et qui jouent le double rôle de réflecteurs et de foyer secondaire de diffusion. C'est dans cette catégorie qu'on peut ranger les nouveaux réflecteurs d'Elster (1).

Le tableau suivant donne les moyens de passer rapidement de l'éclairage par des lampes d'intensité donnée I à un autre système dans lequel on emploie des lampes d'intensité double, triple, etc. Il s'applique à l'éclairage d'une surface horizontale par une seule lampe, par une série de lampes en ligne droite, des lampes disposées aux sommets de carrés et disposées en quinconce. L'unité de longueur est le rayon de la circonférence d'éclairement minimum donné.

UN FOYER.			FOYERS EN LIGNE DROITE.		FOYERS EN QUINCONCE.
Intensité lumineuse. I	Hauteur. h	Rayon de la circonf. d'éclair. minim. r	Hauteur. h	Distance des foyers. $2a = 2r$	Distance des foyers.
1	0.70	1.0	1.65	3.0	4.2
2	0.98	1.4	2.31	4.2	5.9
3	1.19	1.7	2.86	5.2	7.3
4	1.40	2.0	3.30	6.0	8.4
5	1.54	2.2	3.63	6.6	9.2
6	1.68	2.4	4.07	7.4	10.4
7	1.82	2.6	4.40	8.0	11.2
8	1.96	2.8	4.62	8.4	11.8
9	2.10	3.0	4.95	9.0	12.6
10	2.24	3.2	5.17	9.4	13.2

(1) *Elektr. Zeitschr.*, 1891, p. 438.

Éclairage des locaux fermés.

183. Si le problème de l'éclairement d'un plan horizontal à l'aide de plusieurs foyers est difficile, celui de l'éclairement des locaux fermés est particulièrement compliqué. L'éclairage d'une salle dépend, en effet, de bien des facteurs, à côté desquels l'intensité lumineuse des foyers employés ne joue pas un rôle aussi prépondérant qu'on pourrait le croire au premier abord.

En dehors de l'effet d'éclairage, il y a un autre élément à considérer, que M. Wybauw appelle l'*effet d'illumination*; celui-ci est bien une conséquence de l'éclairage proprement dit, mais il ne s'y lie en aucune proportion définie et vient modifier d'une façon souvent importante les jugements que l'on porte sur l'éclairage des salles. Les nombreuses flammes d'un lustre font croire à une intensité de lumière bien supérieure à celle d'une flamme unique qui aurait la même puissance. Deux flammes de gaz ou deux lampes électriques peuvent être très différentes d'intensité : lorsqu'elles ne sont pas absolument voisines, elles produiront à nos yeux le même effet. La lumière d'une simple bougie se voit la nuit à une distance considérable, même à 500 mètres, tandis que son effet comme foyer d'éclairage n'est pas appréciable sur les objets placés à cette distance. Il en est de même d'un mur blanc éclairé la nuit. Une rangée de lampions rapprochés, placés sur la façade d'une maison pendant une fête, produit à certaine distance absolument le même effet d'illumination qu'une rampe de gaz, dont les jets sont cependant beaucoup plus éclairants. Ces effets d'illumination n'ont pas de commune mesure avec l'intensité de l'éclairage et cependant ils concourent à l'effet final obtenu pour une part importante et dont il faut certainement tenir compte.

La lumière diffusée est aussi un élément important dans l'éclairage des locaux fermés. On lui donne comme éclairage une importance qu'elle n'a pas quand on la mesure, en la comparant à la lumière directe simple.

Dans une salle éclairée par des becs de gaz munis de globes opales, les yeux trompés par l'apparence font croire à un éclairage beaucoup plus fort que l'éclairage réel ; il faut prendre en mains un journal ou un livre pour s'apercevoir de l'insuffisance de l'éclairement que donnent ces globes.

Une surface diffusante éclairée devient sur toute son étendue un foyer lumineux ; elle éclaire par tous ses points et suivant toutes les directions, à l'inverse d'une surface simplement réfléchissante, telle qu'une glace. Si un miroir est posé derrière un foyer lumineux, la chambre paraîtra comme éclairée par deux foyers; si l'on remplace la glace par un mur blanc à distance convenable du foyer, l'effet sera bien plus saisissant, quoiqu'en réalité la lumière réfléchie par la surface mate soit de

beaucoup inférieure comme intensité à celle réfléchie par la glace.

Tous les corps réfléchissent la lumière, mais avec une intensité excessivement variable, dépendant de la distance de la source, de leur couleur, et enfin du degré de rugosité ou de poli de leur surface. Cette lumière diffusée est un puissant auxiliaire de l'effet d'éclairement produit par la lumière directe. C'est la diffusion qui fait l'énorme supériorité de la lumière du jour sur toute lumière artificielle. Celle-ci éclaire les objets suivant une direction unique, laissant les faces latérales ou opposées dans une ombre forte que ne peut atténuer que faiblement la lumière artificielle réfléchie par les objets environnants.

Il est assez difficile de se rendre compte de l'accroissement d'éclairage produit par la lumière diffusée par le plafond et les parois d'une salle. On peut cependant, comme M. Mascart l'a montré, s'en faire une idée approximative de la manière suivante. La diffusion n'est pas autre chose qu'une réflexion ordinaire sur une surface dont les inégalités sont de même ordre de grandeur ou plus grandes que la longueur d'onde.

On doit donc admettre que la fraction totale de lumière diffusée est analogue à la fraction de lumière qui serait réfléchie régulièrement sur une surface polie et qu'elle peut, dans certains cas, atteindre 90 p. 100.

Sans préciser la valeur du coefficient f de diffusion, supposons qu'un système de lampes placées dans une salle close émette une quantité totale Q de lumière. Une portion de cette lumière est définitivement absorbée par les parois, et l'autre portion f Q, étant diffusée, se répand de nouveau dans la salle ; la seconde diffusion donne de même une quantité de lumière f^2Q, et ainsi de suite, de sorte que la lumière totale utilisée est

$$Q(1+f+f^2+\ldots)=Q\frac{1}{1-f}.$$

L'éclat moyen d'une feuille de papier placée dans toutes les positions possibles serait, avec des murs noirs, proportionnel seulement à la quantité Q de lumière émise par les sources, et avec des parois ayant le pouvoir réflecteur f, proportionnel à la quantité $Q\frac{1}{1-f}$. L'accroissement d'éclairage est donc représenté par le rapport $\frac{1}{1-f}$; la salle paraîtrait vingt fois plus brillante qu'avec des murs noirs si l'on faisait $f=0{,}95$. On n'arrive pas sans doute à cette valeur extrême, mais le bénéfice des murs blancs ne doit pas en être très éloigné.

184. Lorsqu'il s'agit d'établir l'éclairage d'une grande salle, les nécessités architecturales et autres déterminent la hauteur et l'emplacement des lustres ou foyers ; leur nombre résulte aussi souvent des mêmes nécessités. On peut déterminer l'intensité de ces foyers ou le nombre des lampes de chaque lustre, de manière à obtenir une intensité d'éclaire-

ment minimum, *n lux* par exemple, dans le plan horizontal situé à 1 mètre au-dessus du plancher. C'est ce plan qu'il convient en général de choisir dans ces cas, de préférence au plan même du plancher.

La limite minimum d'intensité d'éclairement ne s'applique évidemment pas aux angles de la salle; il tombe sous le sens que l'on n'entend pas, en fixant cette limite, considérer des points singuliers de l'espace à éclairer. La *ligne d'éclairement minimum* sera une courbe inscrite dans le polygone que forme la pièce et extérieure aux circonférences du plus grand rayon possible inscrites dans ce polygone et ayant les foyers pour centres.

Si les emplacements des foyers sont imposés, il arrivera souvent que la répartition de la lumière laissera beaucoup à désirer sous le rapport de l'uniformité. Dans une salle dont le plafond est divisé en trois compartiments par deux sommiers apparents, l'emplacement des foyers est obligé; des nécessités de décoration et d'illumination produiront souvent des sujétions semblables.

Au point de vue pratique, l'action réfléchissante d'un plafond peut être remplacée par celle d'un foyer lumineux fictif placé verticalement au-dessus du foyer réel et dont l'intensité est égale à une certaine fraction k de l'intensité de celui-ci. M. Wybauw a fait quelques expériences pour déterminer k dans une salle de dimensions moyennes; il a trouvé qu'on pouvait admettre, sans grande erreur, $k = 0,5$.

L'introduction du foyer fictif dans ces calculs peut permettre de traiter mathématiquement le problème et d'en tirer certaines conclusions. Mais le peu d'exactitude du coefficient k empêche d'accorder une grande valeur aux conclusions de calculs de ce genre. On est obligé de s'en tenir à des indications empiriques et à des renseignements fournis par la pratique.

DIMENSIONS DE LA CHAMBRE EN MÈTRES.			NOMBRE de FOYERS.	HAUTEUR des FOYERS au-dessus du sol en mètres.	NOMBRE de MÈTRES CARRÉS par foyer.
Longueur.	Largeur.	Hauteur.			
4.6	4.7	3.8	2-3	2.0-2.2	8.4
5.6	5.6	4.4	5-6	2.0-2.4	5.7
7.5	7.5	5.3	9-12	2.5-2.8	5.3
10.0	10.0	6.9	16-20	2.8-3.1	5.5
12.5	12.5	9.4	25-30	3.5-3.8	5.6
5.7	15.7	12.5	40-45	4.0-4.4	5.8
12.8	18.8	14.0	60-70	4.7-5.3	5.4
22.0	20.0	15.7	100-120	5.6-6.3	4.0

M. Uppenborn (1) a donné comme résumé de son expérience et de me-

(1) *Centralblatt für Elektrotechnik*, vol. III, p. 244.

sures directes le tableau précédent qui indique le nombre et la hauteur des foyers lumineux (de seize bougies) à employer pour l'éclairage de locaux de différentes dimensions.

En examinant ce tableau, on voit que la répartition de l'éclairage correspond en moyenne à un foyer pour 5, 5 mètres carrés, pour des salles de hauteurs très différentes. On doit en conclure que ces locaux pouvaient être suffisamment éclairés mais non également éclairés, d'autant plus que l'éclairement provenant de la lumière diffusée par le plafond varie avec la hauteur du local. Le chiffre d'un foyer par 5,5 m² est assez élevé pour que les différences d'éclairement aient pu passer inaperçues par suite de l'abondance même de l'éclairement.

185. Il est intéressant de discuter comment les quantités de lumière doivent varier avec les dimensions géométriques d'une salle pour que l'éclairement ne change pas.

Nous ne considérerons que le cas des salles fermées avec des plafonds à une hauteur modérée.

Il semble d'abord que, pour donner un même éclairage à deux salles géométriquement semblables, les quantités de lumière doivent être dans le rapport des surfaces ou des carrés des dimensions homologues.

Si l'on imagine, en effet, une source unique au centre d'une sphère, la quantité de lumière reçue par l'unité de surface est en raison inverse du carré du rayon ; l'éclairement restera donc le même si l'intensité de la source est proportionnelle au carré du rayon.

Il en est tout autrement dans la pratique. M. Fontaine a constaté que, dans la plupart des cas, la quantité de lumière doit être proportionnelle au volume de la salle, et non pas seulement à sa surface. Pour un salon, par exemple, dont les murs ont une teinte moyenne, on a reconnu qu'une quantité de lumière de 0,5 bougies par mètre cube donne un éclairement satisfaisant en employant des lampes de 10 à 16 bougies convenablement réparties.

Il faut remarquer qu'une salle n'est jamais entièrement vide. Elle renferme des meubles et des objets de nature quelconque qui sont autant d'obstacles à la propagation de la lumière ; les supports des lampes, lustres, candélabres, etc., interceptent également une partie notable de la lumière ; enfin l'air lui-même n'a pas la transparence parfaite que suppose la loi du carré des distances.

On peut résumer toutes ces causes d'extinction en admettant que l'éclairage efficace d'un foyer s'arrête à une distance déterminée, en deçà de laquelle il aurait son plein effet.

Cette distance limite varie beaucoup avec les conditions de la pratique, le nombre des obstacles et l'éclat de l'air ; elle n'est pas la même pour une salle de spectacle, dont la partie centrale est entièrement vide, que pour un salon garni de meubles, pour une usine encombrée par l'ou-

tillage, etc., et elle est évidemment beaucoup moindre dans les temps de brouillard.

Le tableau suivant, dressé par M. Mascart (1), donne quelques renseignements sur la manière dont les salles de fêtes étaient illuminées aux différentes époques et montre que l'éclairage a suivi une marche progressive très rapide, surtout dans les dernières années.

	DIMENSIONS.		NOMBRE total des bougies.	NOMBRE DE BOUGIES	
	Plan m^2	Volume m^3		par mètre horizontal.	par mètre cube.
Salle des Glaces du Palais de Versailles.					
En 1745	720	9.360	1.800	2.50	0.19
En 1873	»	»	4.000	5.35	0.43
En 1878	»	»	8.000	11.10	0.85
Salle des Fêtes de Compiègne.					
En 1888	440	3.520	1.000	2.28	0.28
Opéra (Soirées de Bal).					
Foyer	672	7.392	6.000	8.93	0.81
Salle	400	9.200	11.140	27.85	1.21
Scène	530	8.000	4.720	8.90	0.59
Hôtel-de-Ville (Bals de 1888).					
Salle des Fêtes	1295	24.000	18.720	14.46	0.78
Salle à manger	300	2.460	4.320	14.40	1.75
Salon de verdure	165	1.350	720	4.36	0.53
Grands salons	496	4.067	7.560	15.24	1.86
Galerie latérale	257	3.600	3.600	13.98	0.56
Salon réservé	195	1.350	720	4.36	0.53
Théâtres (Salle).					
Odéon	350	5.600	2.470	7.06	0.44
Gaité	250	4.800	2.360	9.44	0.55
Comédie française	240	3.500	2.340	9.75	0.67
Palais-Royal	90	1.000	1.900	21.10	1.90
Porte-Saint-Martin	200	3.250	3.200	16.00	0.98
Renaissance	96	1.400	1.970	20.52	1.40

Éclairage des usines.

186. Les renseignements qui précèdent montrent combien sont vagues les indications relatives à l'éclairage des locaux fermés. Tout se réduit à déterminer au préalable le nombre de bougies par mètre carré de surface horizontale ou par mètre cube du volume total et à répartir les foyers lumineux d'intensité modérée de manière à obtenir la répartition d'éclairement la plus uniforme.

(1) *Bull. de la Soc. int. des Electr.*, vol. V, p. 103.

Si l'on en croit certains praticiens qui se sont beaucoup occupés des installations de lumière électrique dans les usines, les calculs basés sur les lois photométriques fondamentales ne doivent pas seuls diriger l'installation. Un correspondant du journal *l'Électricien* donne par exemple les renseignements suivants sur l'éclairage des filatures. Ces établissements exigent beaucoup de lumière; les salles sont de grandes dimensions et renferment des machines nombreuses assez également réparties et de mêmes dimensions. Il n'y a guère d'installations dans lesquelles on emploie moins d'une lampe de 12 ampères par 180 à 200 m²; ce cas suppose une grande hauteur de salle et des fils écrus ou de couleur claire. Le maximum d'éclairage constaté correspond à une lampe de 10 ampères par 80 ou 100 m².

Dans les tissages, le minimum est une lampe de 12 ampères par 120 m². Pour du blanc, de l'écru, des couleurs claires, on a un très bon éclairage avec une lampe de 10 ampères par 75 m² ou 85 m². Pour les tissus noirs il faut compter au moins 1 lampe de 10 ampères par 50 m².

Les renseignements que donne M. Uppenborn sur le même sujet concordent sensiblement avec les précédents. Ils sont résumés dans le tableau suivant :

Nature de l'espace à éclairer.	Nombre de m² par lampe de 10 amp.
Espaces découverts	2000 m².
Halls des gares	1400
Fonderies (éclairage général)	500-600
— (éclairage spécial)	200-250
Fabriques de machines	200
Filatures, tissages	200

Dans une usine, un moyen très simple de vérifier la qualité de l'éclairage consiste à demander aux ouvriers répartis uniformément dans la salle s'ils voient mieux dans tel cas que dans tel autre, et cela lorsqu'ils sont habitués à l'éclairage depuis quelques mois. La qualité et la quantité de la production de l'atelier est aussi un indice de la qualité de l'éclairage. Ces indications ne sont guère scientifiques; elles peuvent avoir cependant du bon, mais il faut les contrôler par des mesures directes de l'éclairement.

187. Ajoutons que le but d'un éclairage artificiel n'est pas toujours de distribuer la lumière d'une manière uniforme dans tous les sens. Pour le travail manuel ou la lecture, on cherche souvent à concentrer la lumière sur certains points ; dans l'éclairage de luxe, on cherche à produire un mélange harmonieux d'ombres et de lumières qui donne du relief aux figures, aux ornements et à la décoration, et l'on est obligé de sacrifier une partie de la clarté générale.

La concentration de la lumière sur certains points donne une certaine importance à un appareil très simple et très utile, l'abat-jour, employé avec tous les foyers lumineux usuels.

Presque tous les abat-jour du commerce présentent un défaut très

fâcheux au point de vue de l'éclairage d'une pièce, c'est que le col supérieur de cet appareil est rétréci au point d'empêcher en grande partie l'éclairage du plafond. Or le plafond est pour l'éclairage d'une pièce de la plus grande utilité; la pièce est mieux éclairée et le *paraît* encore plus, à cause de l'illumination. Quand on emploie une lumière fixe, il faut donc utiliser des abat-jour suffisamment ouverts à la partie supérieure.

La forme de la surface réfléchissante de l'abat-jour a peu d'importance quand il ne s'agit que d'obtenir la réflexion de la lumière vers le bas dans toutes les directions; la forme conique, avec un angle à la base de 35° à 45°, est parfaitement convenable.

Mais la génératrice de la surface de l'abat-jour n'est pas indifférente dans le cas où la flamme est destinée à éclairer principalement la surface d'une table. Dans ce cas il ne convient plus de prendre de ces abat-jour coniques qui réunissent en trop grande quantité les rayons vers le pied de la verticale du foyer, au point de former sur la table en son milieu un rond lumineux intense au détriment de l'éclairement du reste. Il faut prendre un abat-jour dont la surface forme une zone d'un ellipsoïde de révolution dont l'axe coïncide avec celui du foyer lumineux. On peut sans inconvénient remplacer la zone ellipsoïdale par une zone sphérique de mêmes dimensions.

Intensité de l'éclairement exigé pour la lecture.

188. L'étude de l'abat-jour usuel conduit naturellement à donner les valeurs de l'éclairement minimum exigé pour la lecture. Ces valeurs ne sont nullement précises, car elles dépendent beaucoup des conditions physiologiques de l'œil.

L'intensité d'éclairement doit être d'autant plus considérable qu'on veut lire plus vite et moins se fatiguer. M. Javal a constaté que, sur une page d'imprimerie dont l'intensité d'éclairement est d'une bougie-mètre, une bonne vue peut lire des caractères n° 7 à 70 centimètres de la page; des caractères n° 8 à 80 centimètres; des caractères n° 9 à 90 centimètres. M. Léonard Weber a trouvé que la rapidité de la lecture est en raison directe du degré d'éclairement. Ainsi une personne qui lit 6 lignes d'un ouvrage dont l'intensité d'éclairement est de 2 bougies-mètre, en lit 12 dans le même laps de temps, si l'intensité d'éclairement est doublée. Ces conclusions ne sont naturellement vraies qu'entre certaines limites.

M. Cohn, un hygiéniste allemand bien connu, évalue à 50 bougies-mètre l'éclairement produit par la lumière du jour sur une table bien exposée; il estime en outre que le minimum nécessaire hygiéniquement pour lire et écrire sans fatigue anormale doit être de 10 bougies-mètre.

Mesure de l'éclairement.

189. En cas de doute sur la valeur d'un système d'éclairage, il faut recourir à des mesures de l'intensité d'éclairement aux différents points de l'espace éclairé. Les méthodes ont été étudiées dans le chapitre III; il convient cependant d'y revenir pour indiquer les modifications qu'on peut leur faire subir pour les adapter à ce genre particulier de mesures.

Il est évident que deux éclairages sont équivalents quand un même objet, soumis alternativement à l'un et à l'autre, paraît acquérir le même éclat et produit le même effet sur la rétine. On sait que l'œil est assez impropre à donner une appréciation photométrique dans le cas général, mais les renseignements qu'il fournit acquièrent quelque précision quand on réduit la quantité de lumière au minimum nécessaire pour une opération déterminée.

C'est ce qui arrive, par exemple, dans le cas de la lecture. Si l'on veut lire couramment un texte imprimé avec des caractères d'un certain type et placé à une distance invariable de l'œil, il faut que la lumière diffusée par le papier ne tombe pas au-dessous d'un minimum défini pour chaque vue.

Quand l'éclairage devient inférieur à cette limite, la lecture n'est plus courante, on est obligé de lire chaque mot séparément, et l'on cherche en général à rapprocher l'œil du papier, pour augmenter l'angle apparent des caractères, pourvu toutefois que l'accommodation permette de les voir avec netteté.

Ce sont là, comme nous l'avons vu, les éléments des méthodes photométriques basées sur l'acuité visuelle. Ces méthodes sont les plus simples et sont suffisamment précises pour la mesure des éclairements.

Si l'on répète l'expérience avec des caractères d'inégales grandeurs, on reconnaît facilement que, pour une même distance de l'œil, l'éclairage doit être d'autant plus intense pour la lecture courante que les lettres sont plus petites. Une feuille de papier renfermant une suite de phrases imprimées avec des caractères de types différents fournira donc une véritable échelle d'éclairements.

Il est facile de construire un appareil sur ce principe. M. Schutte a imaginé, pour l'usage des photographes, un petit appareil très ingénieux qui peut aussi rendre des services dans la mesure des éclairements et qu'il est facile de modifier avantageusement. L'appareil appelé lux-mètre par M. Wybauw, est assez semblable à celui de M. Schutte.

Cet appareil consiste en un disque mobile autour de son centre et formé par des couches superposées de lames translucides; il est ensuite divisé en une série de secteurs pour lesquels le nombre de couches croît d'une manière progressive, ce qui permet de tamiser plus ou moins la lumière qui le traverse en un point. Derrière ce disque est un écran qui porte sur

une même circonférence une série de caractères de grandeurs inégales.

Le type des caractères que l'on peut lire par transparence avec une fraction donnée de la lumière extérieure donne une mesure approximative de l'éclairement.

Emploi du photomètre de L. Weber.

190. Le photomètre de M. Weber (§ 50) est aussi combiné en vue de procéder aux mesures de l'éclairement, même en employant comme étalon la lampe à acétate d'amyle. Voici le mode d'emploi de cet appareil pour ce but spécial.

Au point et dans la direction suivant laquelle on veut mesurer l'éclairement, on place une plaque de verre opale ou une feuille de carton blanc, blanchi à la céruse; on dirige alors le tube mobile B du photomètre sur ce carton. Pour que ce soit seulement la lumière diffusée par le carton qui pénètre dans ce tube, il faut avoir soin que l'angle formé par les génératrices du cône ayant son sommet au centre du disque opalescent du tube B et sa base sur le carton ne soit pas supérieure à 60°. Il faut en outre veiller à ce qu'aucune lumière directe ne parvienne directement dans le tube et que l'éclairement du carton ne soit pas modifié par la présence de l'observateur.

Supposons d'abord que la lumière diffusée et celle de l'étalon à acétate aient la même couleur. On peut alors produire l'égalité d'éclairement des deux plaques.

Soit e l'intensité d'éclairement du carton blanc; par suite de l'absorption dans le carton, une quantité ηe seulement parviendra au disque mat du tube B et, ce dernier ayant un coefficient de transparence égal à α, l'éclairement du champ du tube mobile est égal à $\alpha\eta e$ (on doit faire $\alpha = 1$, si le tube B est employé sans disque mat). Soit $\frac{d}{100}$ la distance exprimée en mètres du disque mat du tube fixe à la flamme de la lampe à acétate et soit β le coefficient de transparence de cette plaque. L'éclairement du champ du tube fixe est alors, en désignant par I l'intensité de la lampe, en bougies :

$$e' = \beta \frac{I}{\left(\frac{d}{100}\right)^2} = \beta I \frac{10\,000}{d^2}.$$

On a donc pour le pointé relatif à l'égalité d'éclairement des deux plaques :

$$\alpha\eta e = e',$$

d'où l'on tire :

$$e = \frac{\beta I}{\alpha\eta} \cdot \frac{10\,000}{d^2} = C' \frac{10\,000}{d^2}.$$

Si I est exprimé en bougies, cette formule donne l'intensité d'éclairement en bougies-mètre.

On détermine la constante C′ en éclairant l'écran de carton par un foyer d'intensité lumineuse connue et placé à une distance déterminée. On calcule alors l'intensité d'éclairement e_0 du carton placé normalement aux rayons lumineux du foyer et on mesure cette intensité qui correspond à une lecture r sur l'appareil. On a alors :

$$e_0 = C' \frac{10\,000}{r^2}$$

d'où

$$C' = \frac{e_0 r^2}{10\,000}.$$

L'appareil peut être aussi employé sans l'écran blanc en remplaçant la bonnette du tube B par un disque de verre opale désigné par la lettre μ; on donne alors à l'appareil et au tube mobile une position telle que le disque μ occupe le point et la direction suivant lesquels on veut mesurer l'éclairement.

On détermine ensuite la lecture δ de l'appareil pour laquelle les deux champs sont également éclairés. On a alors :

$$e = C' \frac{10\,000}{\delta^2}.$$

La constante C″ se détermine comme C′ à l'aide d'un foyer d'intensité connue.

Ces deux méthodes ne peuvent pas s'appliquer quand la couleur de la lumière diffusée diffère de celle de la lumière de l'étalon à acétate d'amyle. Il faut alors faire deux pointés d_r et d_v, en interposant un verre rouge et un verre vert sur le trajet des rayons lumineux. On cherche ensuite dans le tableau de la page 78 le coefficient k correspondant à $\left(\frac{d_r}{d_v}\right)^2$ et on calcule e à l'aide de la formule

$$e' = kC' \frac{10\,000}{d'^2_r}$$

ou à l'aide de

$$e' = kC'' \frac{10\,000}{\delta'^2_r}$$

suivant qu'on a employé l'écran indépendant ou le disque fixe à tube mobile.

Outre le photomètre de M. Weber, on peut employer aussi celui de M. Mascart, dont M. Pellin construit d'ailleurs un modèle portatif. Il existe encore d'autres modèles de photomètres portatifs basés sur l'emploi des écrans ordinaires de Bunsen ou de Foucault. Il est très simple de modifier ces appareils de manière à les rendre portatifs sans trop leur enlever de leur précision.

TABLE DES MATIÈRES

Préface v

CHAPITRE PREMIER

Les bases de la photométrie.

Loi photométrique fondamentale 1
Intensité de la lumière 6
Actions diverses de la lumière 7
Action photométrique de la lumière 8
Sensibilité de l'œil pour les actions photométriques 9
Variation de la sensibilité de l'œil avec la couleur de la lumière 12
Composition de la lumière émise par les foyers lumineux 13
Éléments photométriques des foyers lumineux 16

CHAPITRE II

Les photomètres.

Classification des photomètres 22
A. — *Photomètres basés sur la loi photométrique fondamentale* 23
Photomètre de Lambert (Rumford) 23
Photomètre de Bouguer 24
Photomètre de Foucault 27
Construction de l'écran de Foucault 28
Photomètres à relief de Villarceau, S. Thompson et Starling, de Conroy 30
Photomètre de Bunsen 31
Théorie de l'écran de Bunsen 33
Construction de l'écran de Bunsen 38
Écrans d'Elster et de Joly 40
Écran optique de Lummer et Brodhun 41
Photomètre Arnoux 44
B. — *Photomètres basés sur l'emploi des diaphragmes et des lentilles divergentes.* 46
Théorie et propriétés des diaphragmes 46
Propriétés des lentilles de dispersion 48
Méthode photométrique de M. Cornu 51
Photomètre de M. Napoli 53
Photomètre à dispersion d'Ayrton et Perry 54
Méthode photométrique de M. Crova 55

Photomètre de M. Mascart..... 57
Emploi de milieux absorbants..... 59
C. — *Photomètres à polarisation et à compensation*..... 59
Photomètre de Duboscq..... 60
Photomètre à polarisation de Wild..... 61
Méthode de compensation de M. Wybauw..... 64
Photomètre à compensation de Krüss..... 64
Photomètre à mélange de Grosse..... 65
D. — *Photométrie hétérochrome*..... 68
Méthodes générales de la photométrie hétérochrome..... 68
Méthode de Macé de Lépinay..... 73
Photomètre de L. Weber..... 75
Méthode de Crova..... 80
Emploi de milieux colorés complémentaires..... 83
E. — *Photomètres basés sur les actions diverses de la lumière*..... 84
Photomètre à sélénium..... 85
Photomètre enregistreur de Dessendier..... 86
Balance photométrique de Lion..... 87
Photomètre à pupille..... 87
Photomètre de Wheatstone et de Masson..... 89
F. — *Spectrophotométrie*..... 89
Spectrophotomètre de Crova..... 93

CHAPITRE III

Les étalons photométriques.

Introduction..... 94
Étalon absolu et étalon secondaire..... 96
Équivalent mécanique de l'unité de lumière..... 97
L'étalon Carcel..... 98
Dimensions et conditions de fonctionnement de la lampe Carcel..... 101
Valeur pratique de la lampe Carcel..... 103
Les bougies..... 105
Combustion de la bougie..... 105
Bougie de l'Étoile..... 107
Bougie anglaise..... 108
Bougie allemande..... 109
Bougie de Munich..... 109
Variations de l'intensité lumineuse de la bougie avec la hauteur de la flamme et avec la consommation..... 109
Mesure de la hauteur de la flamme..... 112
Mesure de la consommation des bougies..... 113
Point de fusion de la stéarine..... 114
Intensité lumineuse des bougies étalons..... 115
Les lampes à pétrole..... 116
La lampe Hefner à acétate d'amyle..... 119
Lampes à benzine..... 119
Lampe Hefner..... 121
Variations de l'étalon Hefner..... 123
Influence de la pureté de l'acétate d'amyle..... 125
L'étalon Giroud..... 127

Bec-bougie étalon de Giroud..... 128
Étalons photométriques relatifs de Giroud..... 130
L'étalon-écran Methwen..... 133
L'étalon au pentane de Vernon-Harcourt..... 135
Modèle de laboratoire..... 138
Modèle industriel..... 139
Étalons basés sur l'incandescence du charbon et du platine..... 142
Étalon Schwendler..... 142
La lampe à incandescence comme étalon absolu..... 143
La lampe à incandescence comme étalon intermédiaire..... 143
Étalon absolu Violle..... 145
Modèle simplifié de l'étalon Violle..... 148
Étalon Violle-Siemens..... 151

CHAPITRE IV

Installations générales et appareils auxiliaires de la photométrie pratique.

Salle de photométrie..... 156
Erreurs personnelles..... 157
Le banc photométrique..... 159
Installation du laboratoire de photométrie..... 162
Photomètre radial de Dibdin..... 164
Photomètre radial de Rousseau..... 165
Holophotomètre de Vernon-Harcourt..... 167
Dispositif de M. Millis..... 169
Emploi des miroirs..... 170
Supports pour lampes à incandescence..... 172

CHAPITRE V

Les foyers électriques.

A. — *Lampes à incandescence*..... 175
Principe des lampes à incandescence..... 175
Fabrication des lampes à incandescence..... 176
Intensité lumineuse des lampes à incandescence..... 177
Intensité horizontale..... 178
Intensité moyenne sphérique..... 181
Résultats du comité d'essais de l'Institut Franklin..... 183
Variations de l'intensité lumineuse avec l'énergie dépensée dans le filament... 187
Influence du degré du vide sur l'intensité lumineuse..... 189
Variations de l'intensité lumineuse avec la durée et avec le régime..... 191
Durée la plus économique d'une lampe à incandescence..... 197
Calcul de la teinte d'une lampe à incandescence..... 198
Valeurs diverses du rendement des lampes à incandescence..... 200
B. — *Lampes à arc*..... 201
Arc voltaïque..... 201
Nature et aspect de l'arc voltaïque..... 201
Différence de potentiel aux électrodes de l'arc..... 204
Nature et fabrication des charbons..... 206

Régulateurs et bougies..... 207
Historique de la photométrie des lampes à arc..... 208
Examen théorique des variations de l'intensité lumineuse d'une lampe à arc.. 209
Variations de l'intensité lumineuse avec l'azimut..... 211
Variations de l'intensité lumineuse avec l'inclinaison..... 212
Intensité moyenne sphérique..... 215
Emploi de globes opales et de réflecteurs..... 218
Variations de l'intensité lumineuse avec l'intensité du courant..... 220
Foyers à arc alimentés par des courants alternatifs..... 225
C. — *Renseignements divers sur les foyers lumineux usuels*..... 227
Consommation des principaux foyers lumineux..... 227
Éclat des foyers lumineux..... 231
Unité d'éclat..... 232
Équivalent mécanique de la lumière..... 234
Rendement optique des foyers lumineux..... 235
La lumière artificielle de l'avenir..... 238

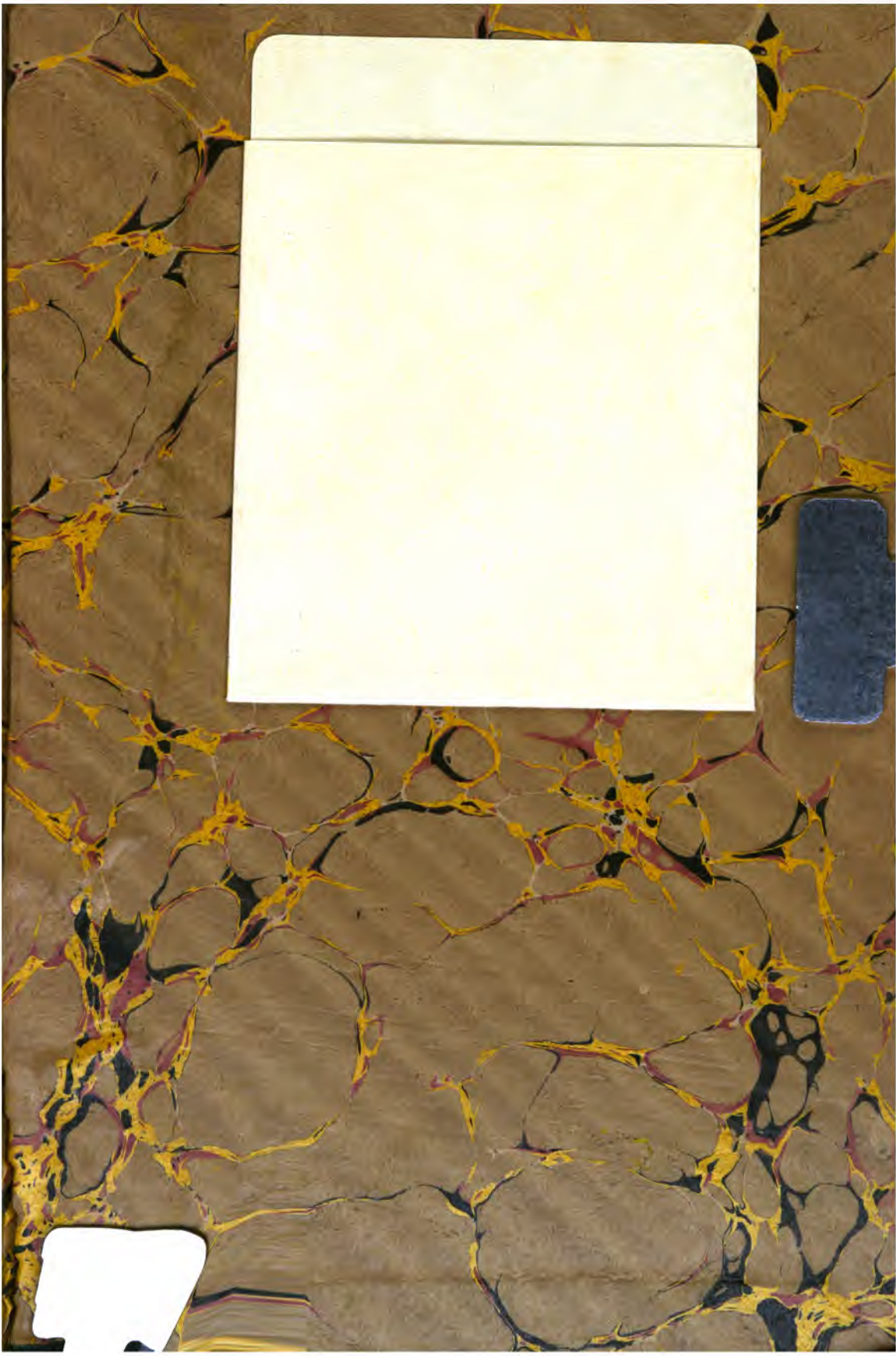
CHAPITRE VI

Répartition et mesure de l'éclairement.

Intensité d'éclairement..... 244
Calcul de l'éclairement d'un plan horizontal..... 245
Éclairement moyen..... 247
Effet utile d'éclairement..... 249
Éclairement sur le plan horizontal et sur le plan normal..... 250
Introduction de l'intensité lumineuse réelle dans les calculs..... 252
Éclairage d'une surface, les foyers étant placés aux sommets de carrés égaux... 258
Éclairage d'une surface donnée correspondant au minimum de dépense..... 259
Renseignements pratiques..... 262
Éclairage des rues..... 262
Éclairage des places et grands espaces découverts..... 263
Emploi des réflecteurs..... 265
Éclairage des locaux fermés..... 267
Éclairage des usines..... 271
Intensité de l'éclairement exigé pour la lecture..... 273
Mesure de l'éclairement..... 274
Emploi du photomètre de L. Weber..... 275

8582-91. — Corbeil, imprimerie Éd. Crété.

89088895081
B89088895081A



b89088895081a